

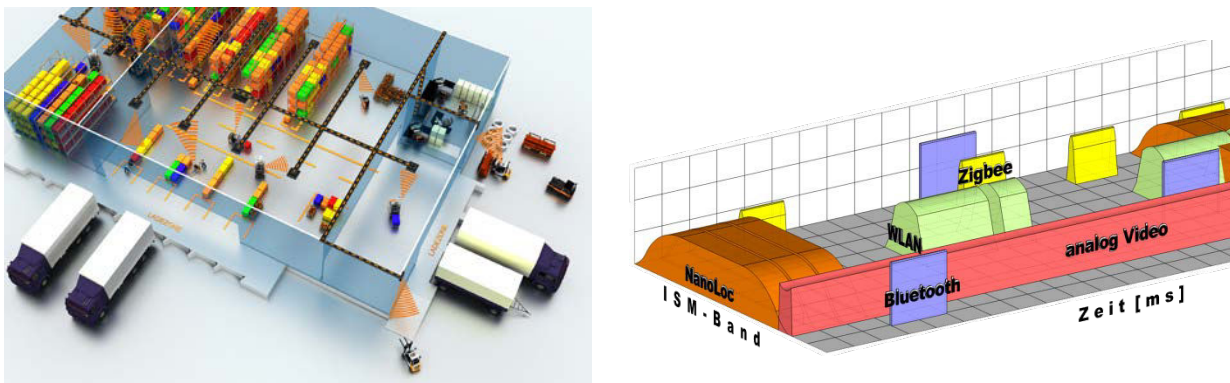
# Schnelle Simulation von Funkkoexistenz-Verhalten im 2,45-GHz-ISM-Band in großflächigen intralogistischen Szenarien

Dr.-Ing. Kai Haake, STILL GmbH, Vorentwicklung,  
B. Eng. Alexander Gisch, ehemals STILL GmbH, Vorentwicklung

## 1. Einleitung

Im intralogistischen Umfeld (z.B. Lagerhallen, s. Abbildung 1) werden verschiedene Funksysteme im 2,45-GHz-ISM-Band benutzt. Es sind z.B.: WLAN (→ z.B. Warehouse-Management-Systeme), Zigbee (→ z.B. Funkübertragung zur Gebäude-Sensorik und Regelung), BlueTooth (→ z.B. RFID-Lesegeräte) und analoge Video-Funkübertragung (→ Überwachungskameras).

Vor allem WLAN wird dabei in großem Maßstab zur Datenkommunikation mit Warehouse-Management-Systemen (WMS) benutzt. Mit diesen Systemen werden logistische Prozesse (z.B. Ein- und Auslagern) gesteuert und überwacht. Dazu werden beispielsweise die Lagerfahrzeuge oder Bar-Code-Scanner mit WLAN-Modulen (WLAN-Clients) ausgerüstet, die sich über ortsfeste WLAN-Access-Points mit einem Steuerrechner verbinden können.



**Abbildung 1** Links: Modernes intralogistisches Lager mit Verwendung von Funksystemen zur Kooperation mit Warehouse Management Systemen. Rechts: Qualitative Darstellung der Frequenzband-Nutzung verschiedener Funksysteme im 2,45-GHz-ISM-Band

Zunehmend finden in der Intralogistik auch Funkortungssysteme (real time localization system - RTLS) für Fahrzeuge Anwendung, die auch das 2,45-GHz-ISM-Band nutzen. Zu solchen Funkortungsdiensten gehört nanoLOC, welches, auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4 basierend, über SDS-TWR (symmetrical double-sided two way ranging) in der Lage ist die Distanz zwischen zwei Funkknoten zu ermitteln [IE06], [IE07].

Soll in ein abgestimmtes und funktionierendes intralogistisches Funkumfeld ein weiterer Funkteilnehmer in das gleiche Frequenzspektrum hineingebracht werden, so stellt sich die Frage nach der Koexistenz im Funkumfeld. Derartige Koexistenz-Betrachtungen sind hochkomplex, da – für die Intralogistik typisch – ein großer Teil der Funkteilnehmer höchst dynamisch seine Position ändert.

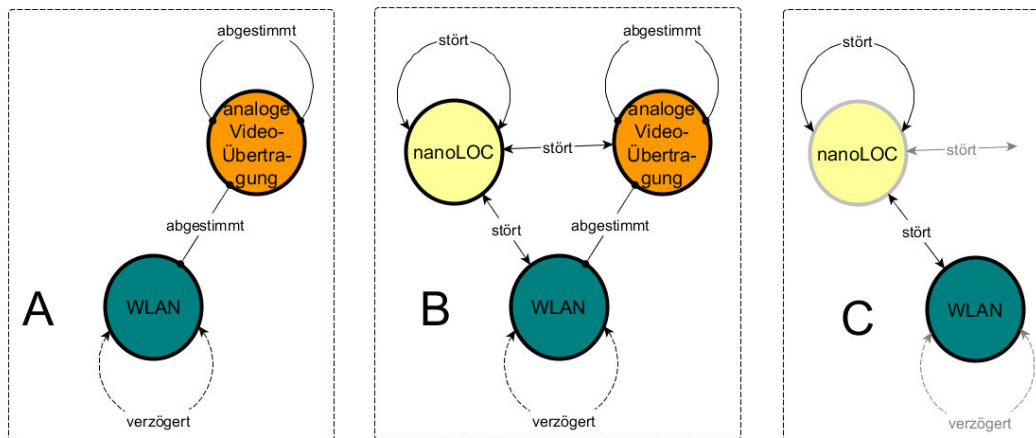
Eine qualitative Belegung des ISM-Frequenzbandes von den oben aufgeführten Funkdiensten- und -übertragungs-Systemen ist in Abbildung 1 dargestellt. Wie man leicht erkennen kann, ist eine kooperative Nutzung des Frequenzbandes kompliziert - besonders bei harten Anforderungen an das Timing der Funkübertragung von RTLS.

Einige Funkdienste haben bereits Methoden zur Verbesserung der Funkkoexistenz (z.B. listen before talk) implementiert, bei anderen müssen diese erst durch entsprechende steuernde Maßnahmen realisiert werden. Diese Maßnahmen sind anwendungsspezifisch und richten sich nach den Funktionen und Anforderungen (besonders bei speziellem Anspruch an das Timing von RTLS, etc.) an die verschiedenen Funksysteme. Funkkoexistenz lässt sich grundsätzlich durch die im Folgenden aufgeführten verschiedenen Maßnahmen bzw. ihre Kombination gewährleisten:

- räumliche Trennung bzw. genügend gr. Pfaddämpfung zwischen den Systemen
- zeitliche Trennung der Übertragung
- spektrale Trennung der Übertragungskanäle

## 2. Definition und Prämissen der zu untersuchenden Problemstellung

Es wird von der nachfolgenden Problemstellung ausgegangen: Es besteht ein funktionierendes Funksystem, welches WLAN und analoge Video-Übertragung beinhaltet (s. Abbildung 2 A). - Die Frequenzband-Trennung soll dabei als perfekt über entsprechende Kanal-Einstellung der beiden Systeme angenommen werden.



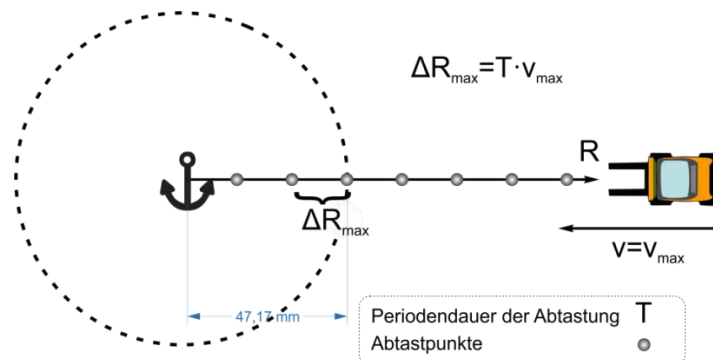
**Abbildung 2 Interferenz-Abhängigkeiten und –Auswirkungen - A: abgestimmtes Funksystem in einem Szenario; B: ein nanoLOC-RTLS wird in ein Szenario gemäß A gebracht; C: reduzierte Interferenz-Abhängigkeiten und –Auswirkungen für Koexistenz-Algorithmus**

Die Verwendung von Bluetooth und ZigBee soll für Koexistenz-Betrachtungen aufgrund ihrer Übertragungssysteme, typischen Datenmengen und Performance-Ansprüche als unerheblich in einer typischen Intralogistik-Umgebung angesehen und daher nicht betrachtet werden.

In das bestehende System wird ein nanoLOC-System (RTLS) hineingebracht (s. Abbildung 2 B). Dieses verwendet für die Funk-Distanzmessung ein 80 MHz breites Frequenzband (plus Seitenbänder). Eine spektrale Trennung zu den anderen Funksystemen ist somit ausgeschlossen. Funktionsbedingt (Ortung) bewegen sich die zu ortenden Funkknoten (TAGs) nahezu uneingeschränkt im Szenario. Zusätzlich sind diese Objekte (Fahrzeuge) prozessbedingt teilweise auch mit einem WLAN-Client ausgerüstet, um in die intralogistische Prozesssteuerung eingebunden zu sein. Somit ist folglich eine räumliche bzw. leistungsmäßige Trennung mit WLAN und der analogen Video-Übertragung nicht realisierbar. Es verbleibt einzig eine zeitliche Steuerung zur Gewährleistung bzw. Verbesserung der Koexistenz. Solch eine Steuerung kann jedoch nur bei nanoLOC vorgenommen werden, da technisch und anwendungsbedingt solch ein Eingriff nicht bei

WLAN oder der analogen Video-Übertragung vorgenommen werden kann. In Bezug auf die Sendeleistung von nanoLOC wird dabei angenommen, dass die maximale Funkleistung von 20 dBm genutzt werden soll, um stets bestmöglichen Funkkontakt zwischen TAGs und ortsfesten Knoten (Ankern) zu gewährleisten. - In der Realität kann das Leistungsniveau entsprechend der Größe des Funkumfeldes angepasst werden kann; es soll hier jedoch unbetrachtet bleiben!

Die Distanz-Messung des nanoLOC-Systems soll dahingehend für eine Ortung benutzt werden, dass über die Distanz-Messung geprüft wird, ob sich der TAG innerhalb oder außerhalb eines definierten Kreisbereichs um einen ortsfesten Funkknoten befindet. Diese Form der Ortung kann als Bereichsortung aufgefasst werden (s. Abbildung 3).



**Abbildung 3** max. Fehler  $\Delta R$  der Abstandsmessung eines abtastenden ideal messenden Systems bei Überfahren der Kreisschwelle mit dem ortsfesten Funkknoten (Anker) im Zentrum

Es ist nun zu untersuchen, ob die neu dazugekommene Funkortungs-Anwendung (RTLS) die bestehende gemäß Abbildung 2 unzulässig stört und vice versa. Wie bereits erwähnt, kann dabei nur das asynchrone Zeitverhalten des RTLS beeinflusst werden. - Eine Leistungsregelung soll unbetrachtet bleiben. Um bei einer gegebenen Geschwindigkeit des Fahrzeugs eine örtliche Auflösung zu erreichen, bedarf es einer bestimmten Periodizität der Abtastung der Distanzmessung (s. Abbildung 3). Bei dem vorliegenden Fall der kreisförmigen Bereichsortung soll sichergestellt werden, dass die überfahrene Kreisschwelle durch die zeitliche Abtastung um maximal die Entfernung  $\Delta R_{max}$  verfehlt wird (das Distanz-Messverfahren des RTLS wird hierbei als exakt angenommen). Die einfachste Möglichkeit den maximalen Entfernungsfehler eines abtastenden Messsystems bei einer maximalen Geschwindigkeit  $v_{max}$  einzuhalten besteht in einer konstanten Abtastung im Zeitraster

$$T = \frac{\Delta R_{max}}{v_{max}} \quad (1)$$

Die minimale Abtastperiodendauer ist durch die Dauer des Messprozesses vorgegeben. Das gleichzeitige Prüfen von  $N_A$  Ankern wirkt sich als linearer vergrößernder Faktor auf die minimal mögliche Periodendauer für den jeweiligen Anker aus. Das Nutzen einer konstanten Abtastung mit der minimalen Periodendauer  $T=const.$  stellt kein Optimum in Bezug auf Frequenzband-Belastung und Ortungsauflösung dar. Aus diesem Grund ist es günstig die Abtastung als Funktion des aktuellen Abstandes und der aktuellen Geschwindigkeit zu berechnen. Die Funktion

$$T = f(R, v) \quad (2)$$

kann dabei beliebig sein. Für ein gegebenes Funk-Szenario können unterschiedliche Funktionen  $f_i(R, v)$  dahingehend untersucht werden, wie sie sich auf Koexistenz und Ortungsgenauigkeit auswirken. So kann unter Variation der Funktion  $f=f_i$  für ein Funk-

szenario ein Optimum gefunden werden. Die Funktionen  $f(R,v)$  können für jeden Anker und/oder jedes TAG mit  $f=f_{A,T}$  grundsätzlich unterschiedlich sein. - Darauf wird jedoch der Einfachheit halber im Folgenden verzichtet.

### 3. Simulationsverfahren

#### a. Stand der Technik

Die betrachtete kurze Wellenlänge (2,45-GHz-ISM-Band) in Verbindung mit den Dimensionen des zu simulierenden intralogistischen Funk-Szenarios (z.B. große Lagerhallen) führen potentiell sehr schnell an die Grenzen bei der Verwendung von numerischen Verfahren der Elektromagnetischen Feldtheorie, wie beispielsweise die Momenten- oder die FDTD-Methode, in denen die Rechenzeit mit der potenzierten Anzahl der diskretisierten Elemente steigt [Le00]. Auch Software-Pakete mit Methoden der geometrischen Optik sind nur in der Lage relativ schnell Aussagen zu Wellenausbreitungen für ein statisches Funk-Szenario zu machen. - Ein bewegtes Szenario bedingt jedoch eine Neuberechnung der Funkausbreitung an jedem Bewegungsschritt.

Die Untersuchung der Funkausbreitung in einem Intralogistik-Szenario liegt in der Kombination von extremen Anforderungen (als Beispiel s. Tabelle 1): große räumliche Dimensionen der Funkausbreitung, viele Funkknoten, schnelle Bewegungen und eine lange Beobachtungs- bzw. Simulationsdauer

#### b. Simulations-Programm RCS-4-IRPS (Rapid Coexistence Simulator for Intralogistic Radio Propagation Sceneries)

Um für die oben beschriebenen Anforderungen unter Berücksichtigung der Einbettung eines ortenden Systems (RTLS) mit speziellen Anforderungen in einer extrem kurzen Berechnungsdauer Aussagen über die Koexistenz machen zu können, ist ein spezielles Simulations-Programm entwickelt worden [Gi13]. Die Simulations-Software gliedert sich wie in Abbildung 4 (links) dargestellt.

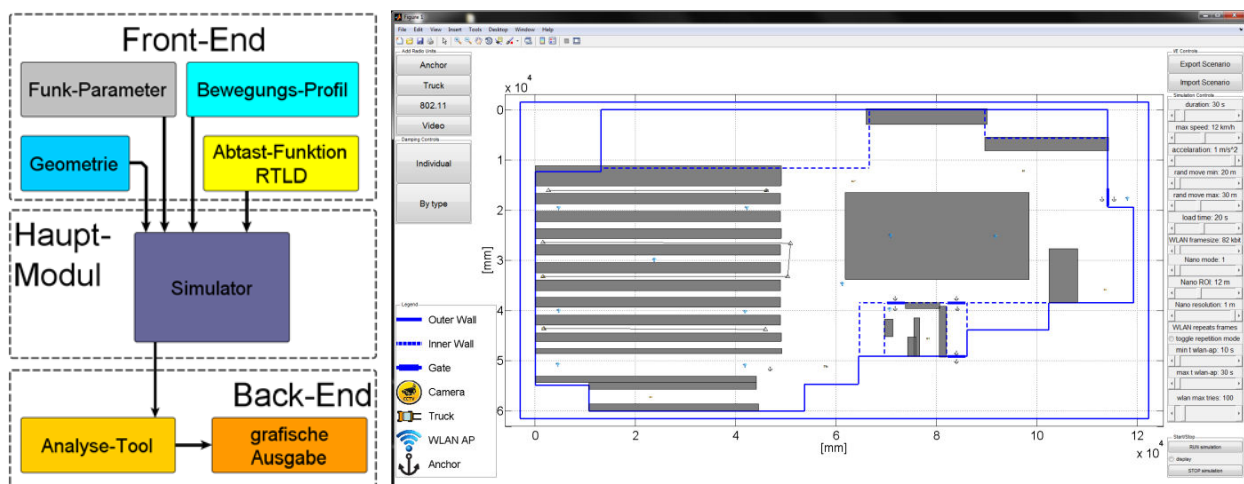


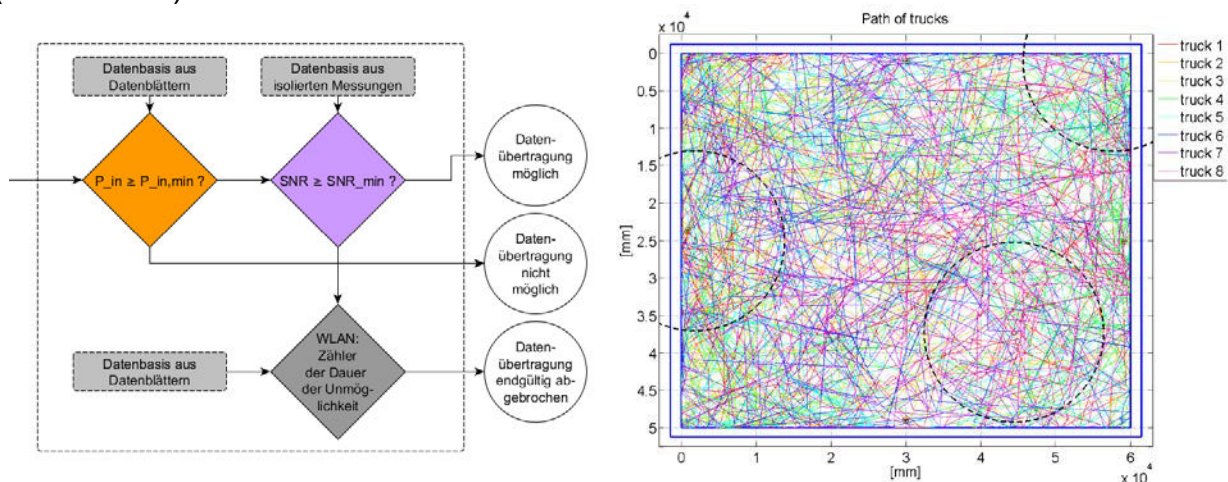
Abbildung 4 Simulations-Programm RCS-4-IRPS: Links: Programm-Struktur; rechts: GUI des Front-Ends zur Definition der Geometrien und der Funk-Parameter

Im Front-End können sowohl die das Funk-Szenario beschreibenden Parameter als auch die für die Funktionen zur zeitlichen Abtastung des Ortungsalgorithmus verwendeten Parameter definiert werden. Dieser Teil der Software besteht aus einem CAD-Werkzeug, mit dem man typische intralogistische Szenarien mit ihren Geometrien und

Pfaddämpfungen modellieren kann (s. Abbildung 4). Den Funkknoten können verschiedene Funkdienste, Positionen, Antennentypen, Sendeleistungen, Nachrichtenlängen und weitere typische Parameter zugeordnet werden. Darüber hinaus ist es möglich, Funkknoten verschiedene dynamische Bewegungsprofile zu zuweisen und damit Funk-Systeme an Fahrzeugen nachzubilden. Auch Dämpfungen durch Gegenstände oder Mauerwerk können in einem Szenario definiert werden. Ebenso können Fading-Effekte (durch Mehrfachreflektionen) über die bekannten Formeln aus [Hu08] berücksichtigt und für die Simulation über Kennzahlen bereichsweise definiert werden. Der Simulator im Hauptmodul spielt ein erstelltes Szenario für eine Zeit  $T_{\text{real}}$  durch und bewertet dabei in Zeitschritten von  $500 \mu\text{s}$  die Empfangsqualität (s. Abbildung 5). Bei der Simulation handelt es sich um eine einfache hybride Methode, die sowohl auf physikalisch-technischen Randbedingungen (aus Datenblättern der Funkmodule, wie z.B. das maximale SNR oder die minimale Empfangsleistung) als auch auf im Labor isoliert aufgenommener Störfempfindlichkeiten der Funkmodule basiert. Die Prüf-Logik fußt dabei auf der in Abbildung 2 C skizzierten Interferenz-Abhängigkeiten und –Auswirkungen im Funksystem:

- WLAN, nanoLOC und analoge Video-Übertragung senden im Parallelbetrieb; sie sind jedoch teilweise vorübergehend inaktiv.
- Kann nanoLOC nicht empfangen, ist die Ortung zu diesem Zeitpunkt unmöglich.
- Ein Aussetzen der Video-Übertragung ist unkritisch und bleibt unbetrachtet.
- Kann WLAN nicht empfangen, so wird der Prozess bis zu einer Time-Out-Zeit wiederholt. – Eine Unmöglichkeit durch Time-Out wird als solche für die Analyse markiert und in der Simulation auf ein erneutes Senden verzichtet.

Im Prüf-Algorithmus wird gemäß Abbildung 5 zu jedem Zeitschritt jedes Modul, das empfangen möchte, betrachtet. - Ein Senden wird stets als möglich angenommen. Die Feldstärkeverteilung jedes Senders wird dazu über die Wellenausbreitung im Fernfeld berechnet [Hu08]. Im Empfangspunkt wird diese aller Sender konstruktiv überlagert (Worst-Case).



**Abbildung 5** Links: Prinzip des Simulator-Moduls zur Bewertung der Empfangsqualität des betrachteten Funkknotens. Rechts: durchlaufene Bewegungspfade der mobilen Funkknoten zur Darstellung der statistischen örtlichen Abdeckung bzw. Verteilung der Funkdistanzen.

In der Simulation ist der Funkverkehr den Funksystemen in ihrer intralogistischen Funktion angepasst. Die Funkteilnehmer (WLAN-Clients und TAGs) werden sowohl auf chaotischen als auch auf definierten Pfaden bewegt. Den Funkteilnehmern, die nicht dauerhaft senden, wird stets eine zufällige Anfangsverzögerung beim Funken zugeordnet, damit im Simulationszeitraster eine statistische Funkkanalbelegung realitätsnäher ist.

Das Back-End ist für die Aufbereitung, Analyse und Darstellung dieser Daten vorgesehen. Es können so Aussagen zu Zeitverzögerungen der Datenübertragungen von WLAN und der Ortungsgenauigkeit von nanoLOC gemacht werden.

In realen intralogistischen Umfeldern laufen die durchgeführten Arbeiten typischerweise sehr zyklisch ab. Dabei nehmen die unterschiedlichen Arbeitsschritte oft nur eine kurze Zeit in Anspruch, so dass längere Beobachtungszeiten in der Simulation einen statistische Ansatz rechtfertigt. In Abbildung 5 wird die Bewegung der Fahrzeuge (unterschiedliche Grautöne) während der Simulation als Spur und damit die örtliche Abdeckung gezeigt.

Bei allen simulierten Phänomenen und Prüfungen der Funkausbreitung (Signalüberlagerungen, Größe der Datenpakete, Übertragungsdauer, Bandbelegung, etc.) werden grundsätzlich extrem harte Worst-Case-Annahmen getroffen. Im Zusammenspiel mit dem statistischen Ansatz sind die Aussagen, die getroffen werden können, zwar beschränkt, jedoch zur Abschätzung und zum bedingten Vergleich geeignet:

$$\text{funktioniert i. d. Simulation} \rightarrow \text{funktioniert i. d. Realität} \quad (3)$$

Der Umkehrschluss von (3) ist dem Folgt Pfeil gemäß nicht möglich. Außerdem lassen sich zwei Simulationsergebnisse desselben Szenarios mit unterschiedlichen Optimierungs-Parametern relativ vergleichen, so dass folgende Aussagen möglich sind:

$$\text{Sim}(\text{Szenario X, Param. A}) \geq^1 \text{Sim}(\text{Szenario X, Param. B}) \quad (4)$$

Die Geschwindigkeit der Simulation ist äußerst hoch. So lassen sich Szenarien, wie in Tabelle 1 definiert, in einem Simulations-Zeitverhältnis von ca. 15:1 ( $T_{\text{sim}}:T_{\text{real}}$ ) mit einem Standard- PC berechnen. – D.h., 1 h Realzeit kann in 15 h nachgestellt werden.

#### 4. Simulation eines einfachen Szenarios

Der Übersicht wegen ist ein Szenario simuliert worden, welches zwar große räumliche Ausdehnung besitzt und viele Funkteilnehmer beinhaltet, jedoch in seiner geometrischen Komplexität beschränkt ist (s. Abbildung 6).

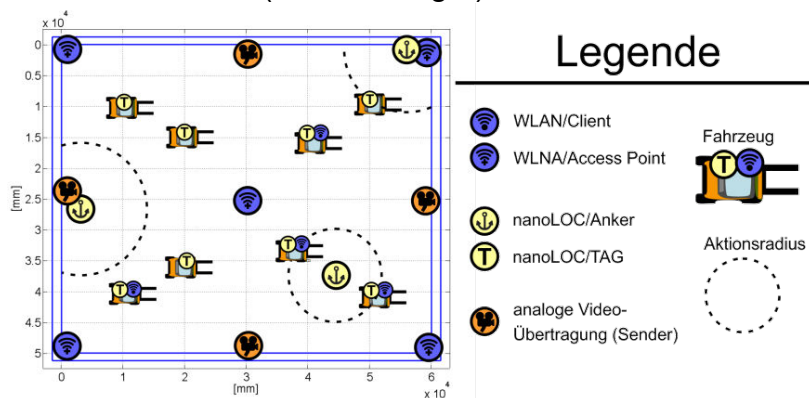


Abbildung 6 einfaches intralogistisches Szenario mit großen Ausdehnungen

Das Szenario wird in den Simulationen mit einem anschließenden Vergleich der Ergebnisse aus dem Analyse-Tool variiert. Die Basis-Parameter des simulierten Szenarios sind in Tabelle 1 aufgeführt. Zum Vergleich der Aussagekraft des in der Simulation verankerten statistischen Ansatzes sind alle Simulationen zweifach durchlaufen worden.

<sup>1</sup> mit „≥“ entspricht: „besser-gleiche“ Koexistenz / Ortsauflösung des RTLS

Szenario	WLAN	analoge Video-Übertragung	Ortungssystem (nanoLOC)
50 m x 60 m Abmessung	5 Access-Points (ortsfest)	4 Kameras	3 Anker (ortsfest); Definition Aktionsradius 12 m
8 Fahrzeuge, $v_{max}=12$ km/h	4 Clients (mobil, auf Fahrzeugen)		8 TAGs (mobil, auf Fahrzeugen)
2,5 m Höhenabstand der mobilen und ortsfesten Antennen	WLAN Nachricht: 50kB (send) + 50kB (receive)		
Simulationsdauer: 60 min			

**Tabelle 1 Basis-Parameter des simulierten Szenarios**

**a. Referenz: WLAN + analoges Video (abgestimmtes System)**

Als Referenz für das Koexistenz-Niveau im in Abbildung 6 skizzierten Szenario ist eine Simulation ohne das nanoLOC-System (abgestimmtes System gemäß Abbildung 2 A) durchgeführt worden. Die Fahrzeuge sind hier also nicht mit einem Ortungssystem ausgestattet. Die Ergebnisse der Zeitverzögerungen der WLAN-Datenübertragungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

[ms]			[m]	Anker 1		Anker 2		Anker 3	
	1. Durchlauf	2. Durchlauf		1. Durchlauf	2. Durchlauf	1. Durchlauf	2. Durchlauf	1. Durchlauf	2. Durchlauf
WLAN Client	330	310	Fahrzeug 1						
WLAN Client	240	280	Fahrzeug 2						
WLAN Client	160	240	Fahrzeug 3						
WLAN Client	310	130	Fahrzeug 4						
WLAN AP 1	260	290	Fahrzeug 5						
WLAN AP 2	190	210	Fahrzeug 6						
WLAN AP 3	320	300	Fahrzeug 7						
WLAN AP 4	240	350	Fahrzeug 8						
WLAN AP 5	270	210							

**Tabelle 2 Szenario-Simulation ohne nanoLOC-System als Referenz des Koexistenz-Niveaus: links: Zeitverzögerungen der Datenübertragung der WLAN-Clients und -Access-Points; rechts: In dieser Simulation sind keine Ortungssysteme vorhanden**

**b. WLAN + analoges Video + nanoLOC @ T=50 ms konst.**

Das Simulations-Szenario aus a) ist um das nanoLOC-System (auf 8 Fahrzeugen) erweitert worden, wobei die Periodendauer der Distanzabtastung konstant auf 50 ms gesetzt worden ist. Die Ergebnisse der Zeitverzögerungen der WLAN-Datenübertragungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass eine eklatante Erhöhung der Zeitverzögerung der WLAN-Datenübertragung die Folge der Nutzung des Ortungssystems ist. Es zeigt sich weiter, dass die räumliche Nähe eines Video-Übertragungssystems zu Anker 3 dessen Empfang verhindert: Es konnten nicht 100% der Fahrzeuge bei Einfahrt in den Kreis erfasst werden.

[ms]			[m]	Anker 1		Anker 2		Anker 3	
	1. Durchlauf	2. Durchlauf		1. Durchlauf	2. Durchlauf	1. Durchlauf	2. Durchlauf	1. Durchlauf	2. Durchlauf
WLAN Client	1380	1440	Fahrzeug 1	1,10	0,95	1,20	1,10	-	-
WLAN Client	1290	1210	Fahrzeug 2	0,90	1,05	0,85	0,95	-	-
WLAN Client	1100	1320	Fahrzeug 3	0,85	1,00	0,85	0,95	-	-
WLAN Client	1040	1170	Fahrzeug 4	0,95	0,85	0,95	0,80	-	-
WLAN AP 1	930	1320	Fahrzeug 5	0,85	0,95	0,90	1,10	-	-
WLAN AP 2	1260	1170	Fahrzeug 6	0,80	1,10	1,00	1,15	-	-
WLAN AP 3	1140	940	Fahrzeug 7	1,20	1,15	0,80	0,95	-	-
WLAN AP 4	990	1330	Fahrzeug 8	0,75	0,95	1,00	0,85	-	-
WLAN AP 5	1060	1210							

**Tabelle 3 Szenario-Simulation mit nanoLOC-System (Distanzabtastung: T=50 ms konst.): links: Zeitverzögerungen der Datenübertragung der WLAN-Clients und -Access-Points; rechts: ΔR als Distanz, um die die zu ortenden Kreisschwelle überfahren worden ist (gemäß Abbildung 3).**

**c. WLAN + analoges Video + nanoLOC @ T=f(R,v)**

Das Simulations-Szenario aus a) ist wieder um das nanoLOC-System (auf 8 Fahrzeugen) erweitert worden, wobei die Periodendauer der Distanzabtastung nun eine Funktion vom Abstand zum Anker und der aktuellen Geschwindigkeit ist  $T=f(R,v)$ . Die Zeitverzögerung der WLAN-Datenübertragung hat wieder das Niveau des abgestimmten Ursprungssystems aus a). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Die räumliche Nä-

he eines Video-Übertragungssystems zu Anker 3 hat dieselbe Auswirkung wie bereits unter b) beschrieben.

[ms]			[m]	Anker 1		Anker 2		Anker 3	
	1. Durchlauf	2. Durchlauf		1. Durchlauf	2. Durchlauf	1. Durchlauf	2. Durchlauf	1. Durchlauf	2. Durchlauf
WLAN Client	400	330	Fahrzeug 1	0,95	1,15	1,00	1,25	-	-
WLAN Client	250	430	Fahrzeug 2	1,20	1,35	1,10	0,90	-	-
WLAN Client	410	280	Fahrzeug 3	1,00	1,15	1,30	1,10	-	-
WLAN Client	210	400	Fahrzeug 4	1,15	0,85	1,10	1,00	-	-
WLAN AP 1	390	340	Fahrzeug 5	1,35	0,95	0,95	1,30	-	-
WLAN AP 2	300	270	Fahrzeug 6	1,25	1,00	1,20	1,15	-	-
WLAN AP 3	340	280	Fahrzeug 7	1,00	0,95	1,15	1,15	-	-
WLAN AP 4	280	380	Fahrzeug 8	0,90	1,00	0,95	1,20	-	-
WLAN AP 5	360	290							

**Tabelle 4** Szenario-Simulation mit nanoLOC-System (Distanzabtastung:  $T=f(R,v)$ ): links: Zeitverzögerungen der Datenübertragung der WLAN-Clients und -Access-Points; rechts:  $\Delta R$  als Distanz, um die die zu ortenden Kreisschwelle überfahren worden ist (gemäß Abbildung 3).

## 5. Konklusion

Mit Hilfe des Simulations-Programms RCS-4-IRPS ist gezeigt worden, dass eine Bewertung der Funkkoexistenz und Ortungsgenauigkeit über die Kennwerte Übertragungsverzögerung und Ortungsgenauigkeit möglich ist. Die Simulation hat herausstellen können, dass sich eine Nutzung eines Koexistenz-Algorithmus für ein RTLS äußerst günstig auf die Koexistenz mit WLAN auswirkt und somit einer koexistenter Betrieb möglich ist. Weiterhin konnten Anker-Positionen identifiziert werden, die in ungünstiger Nähe zu z.B. analogen Video-Funkübertragungssystemen stehen und in der Realität möglicherweise Fehlverhalten aufweisen könnten.

## 6. Zusammenfassung

Für eine extrem schnelle Simulation des Koexistenz-Verhaltens von Funkteilnehmern im 2,45-GHz-ISM-Band im Zusammenspiel mit einem Funkortungssystem in großflächigen intralogistischen Szenarien ist eine spezielle Simulations-Software entwickelt worden. Die Ergebnisse bieten Aussagen zu Zeitverzögerungen der WLAN-Datenübertragung und der Ortungsgenauigkeit von nanoLOC. Es kann den Funkteilnehmern des Ortungssystems ein Koexistenz-Verhalten über spezielle Algorithmen aufgeprägt werden. Diese Algorithmen können dann durch Analyse der Simulationsdaten bewertet und optimiert werden.

## Quellen

- [Fi12] H. Fielitz, "Beschreibung der Methode zur Koexistenzuntersuchung der betrachteten Funkssysteme", TUHH, FB EMV, Berichtsnummer 2012-04-B1, 2012
- [Gi13] Alexander Gisch, "2.45-GHz-ISM-band wireless coexistence simulation in large scale complex dynamic industrial environments", Bachelor-Thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2013
- [Hu08] Y. Huang, K. Boyle, „Antennas : from theory to practice“, Chichester Wiley, 2008
- [IE06] IEEE Computer Society, „Coexistence assurance information for the CSS“, Auszug aus IEEE 802.15.4a, 2006
- [IE07] IEEE Computer Society, „Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) - Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)“, Auszug aus IEEE 802.15.4a, 2007
- [Le00] M. Leone, „Berechnung des Ein- und Abstrahlungsverhaltens von Leiterplatten mit der Momentenmethode“, Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000