

„Industrielle Funklösungen“

Vorhaben Nr. 610311+2

Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS)

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Seit etwa 15 Jahren werden zunehmend Funklösungen für industrielle Automatisierungsanwendungen eingesetzt. In dieser Zeit wurden wesentliche Anforderungen an die Funkkommunikation definiert sowie Gesichtspunkte der Nutzung von Funklösungen (z. B. Koexistenzmanagement) erarbeitet und in verschiedenen Richtlinienblättern veröffentlicht (z. B. VDI/VDE-Richtlinie 2185). Eine wesentliche Herausforderung besteht heute allerdings noch darin, ein optimales Zeitverhalten mit minimaler Fehlerrate zu geforderten Zeitpunkten zu garantieren. Im Gegensatz zur kabelgebundenen Kommunikation ist bei Funk der Übertragungskanal zeitvariant, frequenzselektiv und einer externen Beeinflussung ausgesetzt. In industriellen Umgebungen sind Mehrwegeausbreitung und Bewegungseffekte dominant, aber es sind auch parasitäre Maschinenemissionen sowie der Einfluss anderer Funksysteme zu beachten. Aus Mangel an Kenntnis der detaillierten Systemeigenschaften werden heute einige Funksysteme nicht genutzt oder sogar prinzipienbedingt generell abgelehnt. Damit werden die mit der Funkkommunikation verbundenen wirtschaftlichen Möglichkeiten nicht ausgeschöpft. Es besteht daher ein dringender Bedarf an Testverfahren, mit denen unterschiedliche Funklösungen unter Berücksichtigung relevanter Einflüsse applikationsspezifisch bezüglich des Zeit- und Fehlerverhaltens bewertet werden können.

Ziel der Arbeiten dieses Forschungsvorhabens war die Bereitstellung von geeigneten Standardtestfällen zur einheitlichen Zeit- und Fehlerbewertung industrieller Funklösungen mit Bezug auf ausgewählte Klassen industrieller Automatisierungsanwendungen. Hierbei wurden insbesondere die folgenden thematischen Schwerpunkte adressiert:

- Verbesserung der Produktbewertung durch validierte Methoden und Modelle,
- Unterstützung des Qualitätsmanagements durch systematisches Vorgehen,
- Verbesserung der Transparenz durch einheitliche Verfahren,
- Unterstützung der Realisierung zuverlässiger Funklösungen,
- Vermeidung von Fehlinvestitionen.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurden Kenngrößen und statistische Parameter zur Zeit- und Fehlerbewertung sowie relevante Einflussgrößen spezifiziert. Basierend darauf sind Anwendungsprofile und dazu passende Testfälle definiert worden.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens definierten Standardtestfälle (Maschine, Fertigungshalle, Prozessautomation innen/außen, Fahrstuhlschacht als Spezialapplikation) haben eine sehr hohe Akzeptanz gefunden. Dies wurde im Verlauf zahlreicher Diskussionen mit den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses und weiteren Firmen des GMA-Fachausschusses „Funkgestützte Kommunikation“ und des ZVEI-Arbeitskreises „Wireless Automation“ bekräftigt.

Basierend auf repräsentativen Messungen in realen Umgebungen wurden für diese Standardtests geeignete Modellbeschreibungen und Testverfahren entwickelt und mit Validierungs- und Erprobungsmessungen verifiziert.

Für die Entwicklung der Modellbeschreibungen wurden zunächst Hochfrequenzmessungen der realen Funkkanäle durchgeführt. Daraus wurden geeignete Parameter für eine echtzeitfähige Kanalemulation abgeleitet. Mit umfangreichen Tests wurden diese Modellbeschreibungen anschließend validiert. Dazu wurden applikationsspezifische Messungen der Kenn-

größen von Funksystemen in realer Umgebung durchgeführt und anschließend mit im Labor durchgeführten Emulatorenmessungen verglichen. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass alle Standardtestfälle mit den Emulatorenmessungen abgedeckt werden können.

Anschließend wurden die definierten Standardtestfälle mittels Erprobungsmessungen auf ihre Relevanz bezüglich der dominierenden Einflussgrößen hin untersucht. Dafür wurden Messungen mit Funklösungen unterschiedlicher Technologien bzw. für verschiedene Anwendungsbereiche durchgeführt. Hiermit konnte die Relevanz der spezifizierten Einflussgrößen verifiziert werden.

Mit den erfolgreich entwickelten Testverfahren dieses Forschungsvorhabens haben nun Hersteller die Möglichkeit, durch Labormessungen frühe Aussagen über die Leistungsfähigkeit ihrer Funksysteme für eine bestimmte Anwendungsklasse und -umgebung zu treffen. Da die Emulatorenmessung im Gegensatz zu Messungen in realen Umgebungen deterministisch und damit reproduzierbar ist, können z. B. verschiedene Hard- und Softwareversionen vergleichend getestet werden. Dies ist mit Messungen in einer realen Umgebung nicht möglich.

Die vorgeschlagenen Performance-Klassen A, B, C mit einer zusätzlichen Angabe der absoluten und zeitabhängigen Verfügbarkeit bieten Herstellern und Anwendern die Möglichkeit, für eine bestimmte Anwendungsklasse eine optimale Funklösung zu entwickeln bzw. auszuwählen.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wurden und werden weiterhin umfangreich dokumentiert. Neben Veröffentlichungen in Zeitschriften und auf Konferenzen wurde die entwickelte 'Anwendungsklassifizierung' für eine Berücksichtigung bei der internationalen Normung im internationalen Dokument 'IEC SC65C WG 17 – Wireless Coexistence' am 23.06.2010 vorgestellt. Außerdem wurden die erarbeiteten 'Datenblattangaben zum Koexistenzmanagement' im Oktober 2010 in einem weiteren internationalen Dokument eingearbeitet: IEC Draft Technical Specification IEC/DTS 62657 'Industrial communication networks – Wireless communication network and communication profiles – Wireless Coexistence'.

Zur weiteren Verstetigung der erzielten Forschungsergebnisse soll das entwickelte Testsystem als Industriestandard etabliert werden. Dazu ist im März 2012 vom Fachausschuss FA 5.21 „Funkgestützte Kommunikation“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) ein Aufruf zur Mitarbeit bei dem Thema 'Messtechnische Performance-Bewertung von Funklösungen für industrielle Automatisierungsanwendungen' erfolgt. Die Ergebnisse sollen in Form eines Richtlinienblattes zur VDI/VDE-Richtlinie 2185 veröffentlicht werden. Es richtet sich an Hersteller industrieller Funklösungen, an Planer industrieller Funkanwendungen, an Betreiber industrieller Funkanwendungen, an Funktechnologielieferanten sowie an Normungsgremien für die industrielle Kommunikation bzw. die Funkkommunikation. Die Veröffentlichung des Gründrucks soll 2013 zur Hannover-Messe erscheinen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	80 S., 63 Abb., 44 Tab., 28 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.04.2009
Ende der Arbeiten:	31.02.2012
Zuschussgeber:	BMWi / IGF-Nr. 16192 BR 1+2
Forschungsstelle:	Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg Leiter: Prof. Dr.-Ing. U. Jumar inIT – Institut Industrial IT Leiter: Prof. Dr.-Ing. J. Jasperneite
Bearbeiter und Verfasser:	Dr.-Ing. L. Rauchhaupt, Prof. Dr.-Ing. U. Meier, Paul Neufeld, André Schimschar
Vorsitzender des Projektbegleitenden Ausschusses:	Bernd Kärcher, FESTO AG & Co. KG
Vorsitzender wiss. Beirat:	Thomas Pilz, Pilz GmbH & Co. KG, Ostfildern

Inhaltsverzeichnis

1	Management Report	1
2	Einleitung	5
2.1	Industrielle Funkkommunikation.....	5
2.2	Zielsetzung des Forschungsvorhabens	6
2.3	Vorgehensweise im Projekt und Aufbau des Abschlussberichtes	6
3	Konzept für Standardtests von Funklösungen für die industrielle Automation.....	9
3.1	Der Betrachtungsraum.....	9
3.2	Anforderungen und Bedingungen der Anwendung	11
3.3	Bedingungen der Anwendungsumgebung	11
3.4	Einflüsse der Funkgeräte und Funknetzwerke.....	12
4	Standardisierte Testfälle zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens	14
4.1	Anwendungsprofile.....	14
4.1.1	VDI/VDE Guideline 2185.....	14
4.1.2	ISA 100.....	15
4.1.3	NAMUR Empfehlung NE 124	16
4.1.4	Erläuterung der FITS-Anwendungsprofile	16
4.1.5	Übersicht über die FITS-Anwendungsprofile.....	19
4.2	Testfallbeschreibung	22
4.2.1	Definition von Kenngrößen	22
4.2.2	Testergebnisdarstellung	26
4.2.3	Testfallspezifikation	29
5	Modellierung industrieller Funkkanäle.....	36
5.1	Übersicht.....	36
5.2	Vermessung industrieller Funkkanäle	36
5.2.1	Eigenschaften industrieller Funkkanäle.....	36
5.2.2	Kenngrößen und statistische Parameter zur Charakterisierung industrieller Funkkanäle.....	37
5.2.3	Verwendete Messverfahren.....	38
5.2.4	Durchführung der Messungen	40
5.3	Emulation industrieller Funkkanäle	42
5.3.1	Das Prinzip des Emulators	42
5.3.2	Validierung auf der HF-Ebene	43
6	Testsystem für Standardtests	46
6.2	Anforderungen an das Testsystem	46
6.2.1	Anforderungen der Anwendung (Anwendungsprofil „Maschine“.....	46
6.2.2	Anforderungen der Umgebung (Anwendungsprofil „Maschine“)	46

6.2.3	Anforderungen der zu testenden Systeme (Anwendungsprofil „Maschine“)...	47
6.2.4	Spezifisches Testsystemkonzept.....	47
6.4	Funktionsstruktur.....	49
6.5	Hardwarestruktur.....	49
6.6	Hardwareaufbau.....	50
6.6.2	Standardtestszenario.....	50
6.6.3	DUTs mit Störer.....	51
6.6.4	DUTs mit Zirkulator und Störer.....	51
6.6.5	Kommunikation über Infrastrukturkomponente.....	51
6.7	Spezifikation der Komponenten des Testsystem.....	52
6.7.1	Kanalemulator.....	52
6.7.2	Störsysteme.....	52
6.7.3	Testanwendung/Messung der Kenngrößen auf Applikationsebene.....	53
6.7.4	Testprojektverwaltung.....	55
6.8	Prinzipielle Testdurchführung.....	56
7	Exemplarische Testergebnisse.....	58
7.1	Übersicht.....	58
7.2	Exemplarische Ergebnisse der Validierungstests.....	58
7.2.1	Testreihe Maschine - WISA.....	59
7.2.2	Testreihe Fertigungshalle - Bluetooth.....	61
7.3	Exemplarische Ergebnisse der Erprobungstests.....	63
7.3.1	Untersuchung des Einflusses von zeit- und frequenzvarianten Funkkanälen auf industrielle Funkgeräte.....	64
7.3.2	Erprobungsmessung mit unterschiedlichen Entfernungen der DUTs.....	66
7.4	Definition und Spezifikation von Performance-Klassen.....	67
7.5	Beispiel für die Testergebnisdarstellung mittels Performance-Klassen.....	69
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	71
9	Anhang.....	73
9.1	Literaturverzeichnis.....	73
9.2	Abkürzungsverzeichnis.....	74
9.3	Softwaredokumentation.....	74
9.4	Veröffentlichungen.....	75
9.5	Liste der FITS Dokumente.....	76
9.6	FITS Zertifikatformular.....	77

1 Management Report

Wireless solutions for industrial applications have been used for approx. 15 years. In the course of that time essential requirements and guidelines for a successful wireless performance (e.g. coexistence management) have been developed and published (e.g. VDI/VDE 2185: Radio-based communication in industrial automation). Despite these achievements one essential demand still exists: realizing an optimal time performance with a minimum error rate at a required time.

In contrast to wire-based communication radio channels suffer from time and frequency variance and might be influenced by external interference. Multipath propagation and motion are dominant effects in industrial environments. However, parasitic machine emissions and coexisting radio systems have to be considered as well. Due to insufficient knowledge of inherent system features some radio systems are ignored or even consciously avoided. As a consequence, attractive economic possibilities of wireless industrial solutions are only partially utilized. Therefore, appropriate measurement methods for different application-specific wireless technologies are urgently needed.

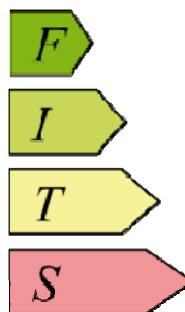


Figure 1: Project logo

The goal of this research project was to develop appropriate standard test cases for a unified evaluation of the time and error performance of industrial wireless solutions with respect to selected classes of industrial applications. Especially, the following issues were addressed:

- Improve product assessment with validated methods and models.
- Support quality management by systematic approaches.
- Support realization of reliable wireless systems.
- Avoid unprofitable investment.

Fundamental parameters for time and error assessment such as transmission and update time, packet error rate and availability were derived as basic prerequisites. The 95 % percentile for transmission time and the standard deviation for update time were selected as appropriate statistical time measures.

Next, application profiles and related test cases were specified (Table 1). Additionally, the environment 'elevator shaft' was included as a special application. These profiles and specifications were defined in consequence of several discussions with companies of the GMA working Group 'Radio Based Communication' and the ZVEI working group 'Wireless Automation' that were either actively involved or interested in this project.

Table 1: Application profiles (NLOS/OLOS: non-/obstructed line of sight)

Influencing parameter (application related)	Machine	Factory hall	Process plant (indoor)	Process plant (outdoor)
Number of communication devices	16	50	100	100
Spatial dimension of the communication system (L, W, H) in m	10, 5, 5	100, 25, 10	100, 25, 15	500, 500, 15
Distance between communication devices	10 m	100 m	100 m	700 m
Motion of the communication devices	0 m/s, 5 m/s	1,5 m/s	0	0
User data length	2 Byte	64 Byte	20 Byte	20 Byte
Initiation of data transfer	periodic	periodic	periodic	periodic
Transmission interval	100 ms	250 ms	4 s	4 s
Intervisibility	NLOS	NLOS	NLOS, OLOS	NLOS, OLOS
Other radio communication systems	WLAN	WLAN	WLAN	WLAN
Location of application area	indoor	indoor	indoor	outdoor

Based on representative measurements in real environments appropriate model descriptions and test procedures were developed for these standard test cases. Both were verified with validation and trial measurements.

Figure 2 shows the prototype test set-up. A real-time channel emulator connected to two shielded test boxes can be seen at the bottom of Figure 2. The radio devices under test (DUTs) need to be placed within these test boxes. The top part shows the PC for controlling, management and evaluation purposes. Further required measurement devices (multi-face devices, protocol analyzer, vector signal generator, real-time spectrum analyzer) can be seen in the center.

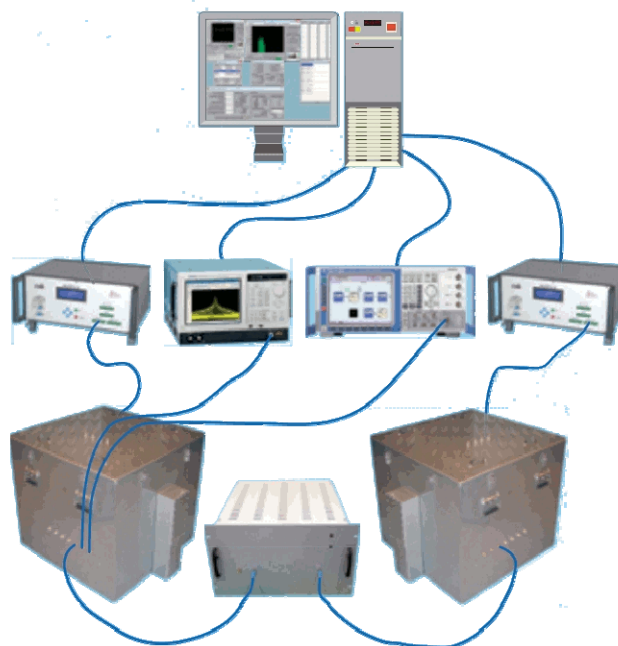
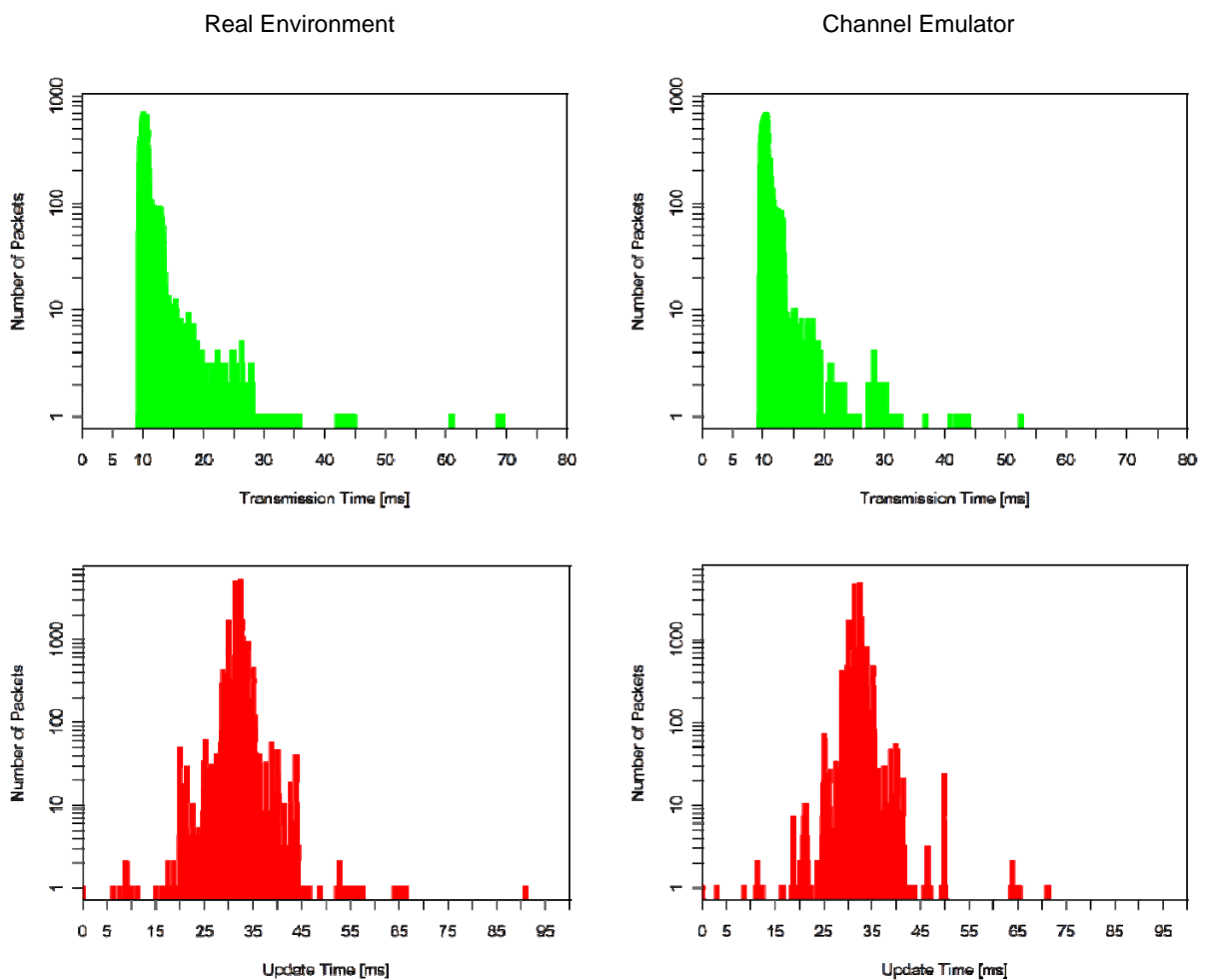


Figure 2: Prototype test set-up

The development of the model descriptions started with high-frequency radio channel measurements in the real environment. Next, appropriate parameters for real-time channel emulation were derived. These model descriptions were verified with validation measurements (fundamental time and error parameters) of the radio systems in the real environment and compared to measurements with the channel emulator in the lab. Table 2 shows exemplary results for the standard test case 'factory environment'. In the lab it could be acknowledged that all measurements of the standard test cases can be realized with emulated test measurements.

Table 2: Comparison of transmission time (top row) and update time (bottom row) for Bluetooth communication in a factory hall. Left column: real environment, right column: lab test with channel emulation (link margin 6 dB, no interferer)



The successfully developed test procedures of this research project enable manufacturers to evaluate the application-specific performance of their wireless systems in an early stage of development. Due to the fact that emulator-based test procedures are deterministic and thus reproducible, manufacturers can perform comparison measurements between different hardware and software versions. In real environments this is not possible.

We propose the performance classes A, B, and C (see logo in Figure 1) with additional information concerning total and time-dependent availability (Table 3). This enables manufacturers and customers to develop and select an optimal wireless solution for specific application areas.

Table 3: Exemplary results of different standard test groups (TG) and test cases (TC). TT: transmission time, UT: update time, SD: standard deviation

Standard TG name	Standard TC name	TT		UT		Symbol	Performance class			Availability
		Mode	P95	Mean	SD		Time			
Machine	Standard	35,7	45,9	100,4	16,9	✘			C	99,52%
Machine	Interferer	15,8	18,9	40,0	3,4	✘			A	100,00%
Factory hall	Standard	10,2	12,8	32,0	1,6	✘			C	100,00%
Factory hall	Standard	0,3	2,4	31,9	2,1	✓			A	99,96%
Factory hall	Interferer	0,3	2,5	33,0	6,0	!			B	97,92%
Factory hall	Standard	0,4	0,6	32,0	0,3	✓			A	100,00%
Factory hall	Interferer	0,6	4,2	32,2	6,7	✘			C	99,53%
Factory hall	Interferer	0,5	3,6	32,0	5,0	!			B	99,94%
Process plant	Indoor - Movement	23,2	25,0	50,2	4,8	✓			A	99,96%
Process plant	Indoor - Movement	22,6	24,7	53,5	124,5	✘			C	96,01%
Special	Standard	0,4	0,5	10,0	0,2	✓			A	100,00%
Special	Standard	10,7	28,1	50,0	11,5	✓			A	100,00%

Results of this research project have been and will be further published. Apart from publications in journals and on conferences the developed 'application classification' was announced in June 2010 to be included in the international document 'IEC SC65C WG 17 - Wireless Coexistence'. Additionally, 'coexistence related data sheet parameters' were specified and included in the international document 'IEC Draft Technical Specification IEC/DTS 62657: Industrial Communication Networks - Wireless Communication Network and Communication Profiles - Wireless Coexistence' in October 2010.

In order to put the project results on a broader basis, the developed measurement methods shall be established as industrial standards. In March 2012 the GMA working group 'Radio Based Communication' of the VDI/VDE association 'Measurement and Automation (GMA)' launched a call for participation in the project 'Measurement Based Performance Evaluation of Wireless Solutions for Industrial Automation Applications'. Results shall be published as guidelines following the VDI/VDE guideline 2185 'Radio Based Communication in Industrial Automation'. This guideline is aimed at manufacturers of industrial wireless solutions, planning persons and operators of industrial wireless applications, suppliers of wireless technologies, and standardizing bodies for industrial and wireless communication. The green print shall be published in 2013 on the occasion of the Hanover Exhibition.

The research project was performed in close co-operation with the GMA working group 'Radio Based Communication' of the VDI/VDE association 'Measurement and Automation (GMA)' and the ZVEI working group 'Wireless Automation'.

All goals of the research project have been successfully met.

2 Einleitung

2.1 Industrielle Funkkommunikation

Funkgestützte Kommunikation erfreut sich zunehmender Akzeptanz innerhalb der industriellen Automatisierungstechnik. Als Kabelersatz soll die Installation der Automatisierungssysteme vereinfacht werden. Man erhofft sich eine einfachere Inbetriebnahme und eine vereinfachte Wartung von Maschinen und Anlagen während des Lebenszyklus [26], [2] sowie höhere Flexibilität. Entscheidend für den Einsatz von Funklösungen in automatisierungstechnischen Anwendungen ist deren Verfügbarkeit sowie ein adäquates Zeitverhalten [23]-[20]. Die Herausforderung für den erfolgreichen Einsatz von Funklösungen in industriellen Anwendungen besteht darin, ein optimales Zeitverhalten mit minimaler Fehlerrate zu den geforderten Zeitpunkten zu garantieren. Hierbei quantifiziert die Anwendung diese Parameter (quality of service, QoS).

Im Gegensatz zu kabelgebundenen Kommunikationsnetzwerken ist der Funkkanal zeitvariant, frequenzselektiv und externen Beeinflussungen ausgesetzt (siehe Abbildung 3). Zu den passiven Einflüssen zählen Ausbreitungseffekte wie Dämpfung, Mehrwegeausbreitung und Bewegung. Für industrielle Anwendungen in der Fabrikautomation sind hierbei die Mehrwegeausbreitung und die Bewegungseffekte dominant. Zu den aktiven Störeinflüssen zählen parasitäre Maschinenemissionen sowie friedliche und feindliche Funksysteme. Während die Einflüsse "friedlich" der in räumlicher Nähe betriebenen Funkssysteme durch Koexistenzmaßnahmen minimiert werden können, hat man auf "feindliche" Funkssysteme, die z. B. auf einem Nachbargrundstück betrieben werden, keinen Einfluss. Hierbei ist anzumerken, dass der Aspekt der gleichzeitigen Nutzung ein und derselben Ressource selbst bei kabelgebundenen Kommunikationssystemen nicht abschließend untersucht ist [1].

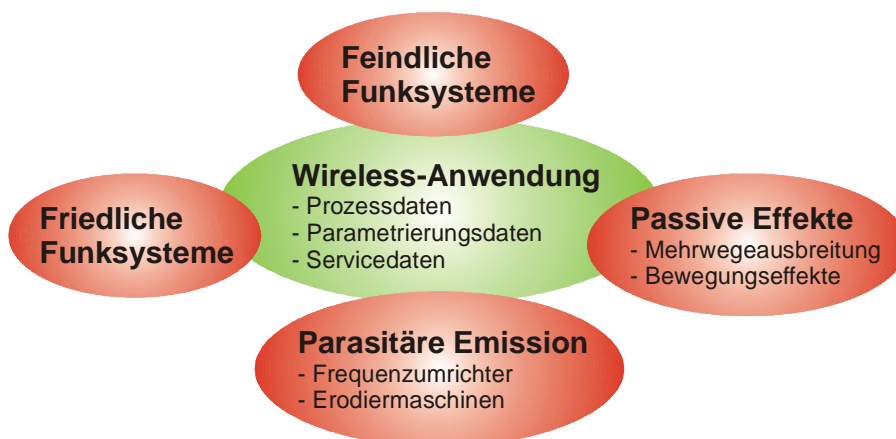


Abbildung 3: Störeinflüsse auf eine Funkanwendung

Industrielle Anwendungen zeichnen sich durch den Einsatz unterschiedlicher, spezialisierter Funklösungen aus, weil keine Funktechnologie allen Anforderungen gerecht wird [20]-[21]. Es werden daher verschiedene Funktechnologien verwendet, die sich die Ressourcen Raum, Frequenz, Zeit, Codierung und Polarisation teilen müssen. Das Koexistenzverhalten ist daher der entscheidende und damit begrenzende Systemparameter. Um mögliche Beeinträchtigungen einer vitalen industriellen Funkanwendung zu vermeiden, werden zurzeit von den in Fabrikhallen zuständigen Funknetzplanern aus Mangel an Kenntnis der detaillierten Systemeigenschaften einige Funkssysteme nicht zugelassen. Beispielsweise werden Bluetooth-basierte Systeme oft nicht zugelassen, wenn WLAN-Anwendungen eine höhere Priorität genießen. Es gibt sogar Automobilproduzenten, die Funkssysteme aus Mangel an Kenntnissen oder sogar prinzipienbedingt generell ablehnen. Damit werden die mit der Funkkommunikation verbundenen wirtschaftlichen Möglichkeiten nicht ausgeschöpft.

Es besteht daher ein dringender Bedarf an Testverfahren, mit denen unterschiedliche Funklösungen unter Berücksichtigung aller relevanten Störeinflüsse applikationsspezifisch bewertet werden können.

Zurzeit gibt es keine derartigen standardisierten Testverfahren [22]. Dies liegt einerseits daran, dass solche Verfahren für die ursprünglichen Anwendungsbereiche der zum Einsatz kommenden Funktechnologien nicht erforderlich sind und andererseits die Beeinflussungsszenarien und Funktechnologien außerordentlich komplex sind. Mit einem solchen Verfahren können Funklösungen verschiedener Technologien und verschiedener Hersteller einheitlich bewertet werden. Dadurch ergeben sich u. a. folgende Vorteile:

- Es können bereits während der Produktentwicklung gezielte Maßnahmen zur Optimierung getroffen werden, so dass eine verbesserte Produktqualität zu erwarten ist.
- Den Funknetzplanern in Fabrikhallen werden quantitative Systemparameter zur Verfügung gestellt, die einen zuverlässigen und koexistenzoptimierten Einsatz von verschiedenen Funktechnologien ermöglichen.

Verbesserte Produkteigenschaften und das frühzeitige Erkennen möglicher Systemgrenzen werden letztlich die Akzeptanz funkbasierter Automatisierungskomponenten auf der Anwenderseite verbessern und sich wirtschaftlich auszahlen.

2.2 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens FITS war die Ableitung von Standardtests, die eine einheitliche Bewertung des Zeit- und Fehlerverhaltens von Funklösungen mit Bezug zu verschiedenen Klassen industrieller Automatisierungsanwendungen möglich machen. Das für das Forschungsvorhaben genutzte Logo (siehe Abbildung 4) soll den Bezug der Zielstellung zu bekannten Klassifizierungen von Produkteigenschaften (z. B. Energiebedarf von Geräten) herstellen.

Mit den Ergebnissen des Projektes soll Herstellern ein Instrumentarium an die Hand gegeben werden, um frühzeitig ihre Funklösungen gezielt auf die Anforderungen einer Anwendungsklasse und unter Berücksichtigung der tatsächlich dort vorherrschenden industriellen Einsatzbedingungen optimieren zu können.

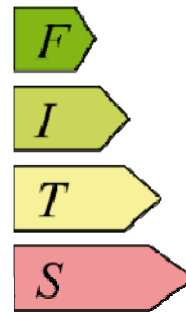


Abbildung 4: Logo des Forschungsvorhabens

Planern und Betreibern soll die Möglichkeit gegeben werden, das Zeitverhalten und die Zuverlässigkeit von Funklösungen besser einschätzen zu können. Insbesondere die derzeit noch bestehenden Hindernisse für ein gezieltes Koexistenzmanagement sollen durch die Bereitstellung einheitlicher und anwendungsbezogener Kenngrößenwerte minimiert werden, um so eine heute noch nicht mögliche Effizienz bei der Nutzung des Frequenzspektrums zu erreichen.

Im Forschungsvorhaben sollten Lösungen für folgende Problemstellungen erarbeitet werden:

- Problem 1: Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen
- Problem 2: Einheitliche Bewertung unterschiedlichster Funklösungen
- Problem 3: Geringer Testaufwand
- Problem 4: Hoher Grad an Reproduzierbarkeit
- Problem 5: Hohe Testabdeckung

In diesem Bericht wird Schritt für Schritt dargestellt, wie Lösungen für die einzelnen, in der Vorhabensbeschreibung identifizierten, Probleme erarbeitet wurden.

2.3 Vorgehensweise im Projekt und Aufbau des Abschlussberichtes

Das Anliegen, die Vielfalt der Anforderungen und Bedingungen industrieller Automatisierungsanwendungen, die bei der Nutzung von Funkkommunikation zu berücksichtigen sind, durch wenige, standardisierte Anwendungsfälle abzubilden, ist eine große Herausforderung.

Es muss ein Kompromiss zwischen möglichst großer Praxisnähe auf der einen Seite und überschaubarem Aufwand für die Bewertung der Funklösungen auf der anderen Seite gefunden werden. Den Bearbeitern war von vornherein klar, dass einzelne Entscheidungen oder Festlegungen, die im Verlaufe der Projektbearbeitung getroffen wurden, Raum für Diskussionen bieten. Deshalb soll zu Beginn anhand Abbildung 5 die Herangehensweise im Projekt vorgestellt werden, damit die Entscheidungsprozesse nachvollzogen werden können.

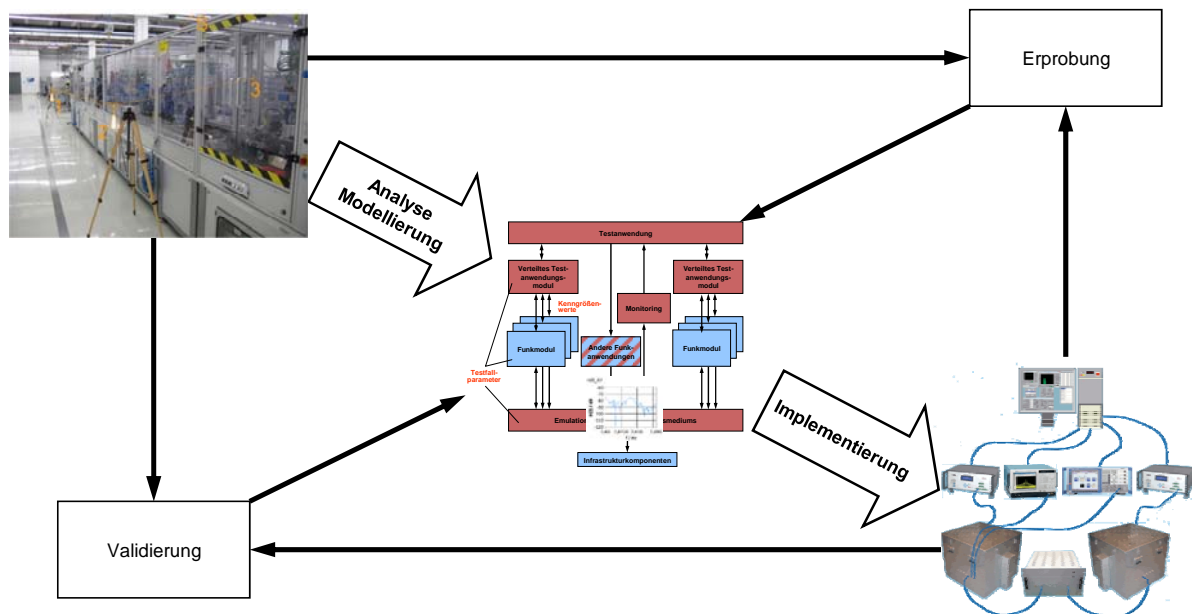


Abbildung 5: Herangehensweise bei der Projektbearbeitung

Ausgangspunkt für die Festlegung von einheitlichen Testbedingungen war die Analyse infrage kommender Anwendungsfelder der industriellen Automation. Dazu wurde entsprechende Literatur ausgewertet und Erfahrungen aus Aktivitäten in Arbeitskreisen und Normungsgremien genutzt. Außerdem wurden Messungen des Übertragungskanalverhaltens in verschiedenen industriellen Umgebungen durchgeführt. Die Ergebnisse flossen in die Modellierung einiger weniger Anwendungsfälle, die so genannten Standardtestfälle, ein. Dabei wurden sowohl die Anforderungen und Bedingungen der Anwendungsbereiche abstrahiert als auch die Charakteristik des Übertragungskanals. Anschließend wurde das Konzept für ein Testsystem erarbeitet, mit dessen Hilfe Funklösungen entsprechend der spezifizierten Standardtestfälle untersucht werden können. Das Testsystem wurde partiell, exemplarisch implementiert, um Untersuchungen durchführen zu können. Zur Validierung der Modelle wurden Standardtestfälle mit ausgewählten Funklösungen sowohl in realer, industrieller Umgebung als auch mithilfe des Testsystem-Demonstrators durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Außerdem wurde mithilfe von Erprobungstests untersucht, inwieweit die Variation einzelner Einflussgrößenwerte Einfluss auf das Ergebnis des Tests einer Funklösung haben kann. Damit konnte die Spezifikation der Werte für die Standardtestfälle evaluiert werden.

Die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind in diesem Bericht zusammengefasst. Der Bericht ist wie folgt aufgebaut. In Kapitel 3 wird dargestellt, welche Einflüsse auf das Zeit- und Fehlverhalten zu berücksichtigen sind und woraus sich diese ergeben (Problem 1¹). Ausgehend davon wurden Anwendungsbereiche analysiert, so weit möglich quantitative beschrieben und die in Kapitel 4 beschriebenen Testfälle abgeleitet (Problem 2).

¹ Diese Anmerkung weist darauf hin zu welchem in Abschnitt 2.2 aufgeführten Problem das entsprechende Kapitel einen Lösungsbeitrag leistet.

In Kapitel 5 wird die Entwicklung der Funkkanalmodelle für die spezifizierten Testfälle erläutert (Problem 3). Kapitel 5.1 beschreibt die Umsetzung der theoretischen Vorbetrachtungen im Testsystem, das der Durchführung der Standardtests dienen soll (Problem 4). In Kapitel 7 schließlich werden exemplarisch Ergebnisse von Tests präsentiert, die zur Validierung der Modelle und zur Erprobung der Testfallspezifikationen durchgeführt wurden (Problem 5). Kapitel 8 fasst die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammen, erläutert den Nutzen für Unternehmen, die mit der industriellen Funkkommunikation befasst sind und stellt Pläne für das weitere Vorgehen dar.

3 Konzept für Standardtests von Funklösungen für die industrielle Automation

3.1 Der Betrachtungsraum

Ausgangspunkt für die Erarbeitung von Standardtests zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens von Funklösungen mit Bezug zu industriellen Automatisierungsanwendungen ist die Beschreibung des Betrachtungsraumes. Die wesentlichen Bestandteile des Betrachtungsraumes zeigt Abbildung 5. Dargestellt ist eine industrielle Automatisierungsanwendung, die verteilte, ggf. mobile Anlagenbestandteile beinhaltet.

- ❖ *Beispiel 1: Die Daten binärer Sensoren an einem Roboterwerkzeug sollen an die Speicherprogrammierbare Steuerung übertragen werden, wobei das Roboterwerkzeug je nach Produktionsschritt durch ein anderes ausgetauscht werden kann.*
- ❖ *Beispiel 2: Fahraufträge sollen von einem Produktionsleitsystem an Gabelstaplerterminals übertragen werden, die Materialien in einer Fertigungshalle transportieren.*

Die verteilten Anlagenbestandteile seien mit Funkgeräten ausgerüstet, die ein Netzwerk bilden und somit eine drahtlose Kommunikation über ein Funkmedium ermöglichen. Konkrete Aussagen über die Art der Funkgeräte bzw. über das Funknetzwerk, das sie bilden, werden nicht getroffen. Es wird lediglich festgestellt, dass eine Schnittstelle zwischen den verteilten Automatisierungskomponenten und den Funkgeräten existiert und dass ein Funknetzwerk neben den Funkgeräten auch Infrastrukturkomponenten beinhalten kann. Bei der Schnittstelle kann es sich um eine Speicherschnittstelle, um eine beliebige serielle Kommunikationsschnittstelle oder um eine digitale Prozessschnittstelle handeln. Auch bezüglich der Logik für den Datenaustausch an dieser Anwendungsschnittstelle werden keine Aussagen getroffen.

- ❖ *Beispiel 1: Ein Bluetooth-Funkmodul ist in ein Gerät mit digitalen Ein- und Ausgaben integriert. Die digitalen Ein- und Ausgaben stellen die Anwendungsschnittstelle dar.*
- ❖ *Beispiel 2: Ein WLAN Access Point stellt den drahtlosen Zugang zum LAN her, an dem die Komponenten des Produktionsleitsystems angeschlossen sind. Die Anwendungsschnittstelle ist ein 100 MBit/s Ethernet-Anschluss.*

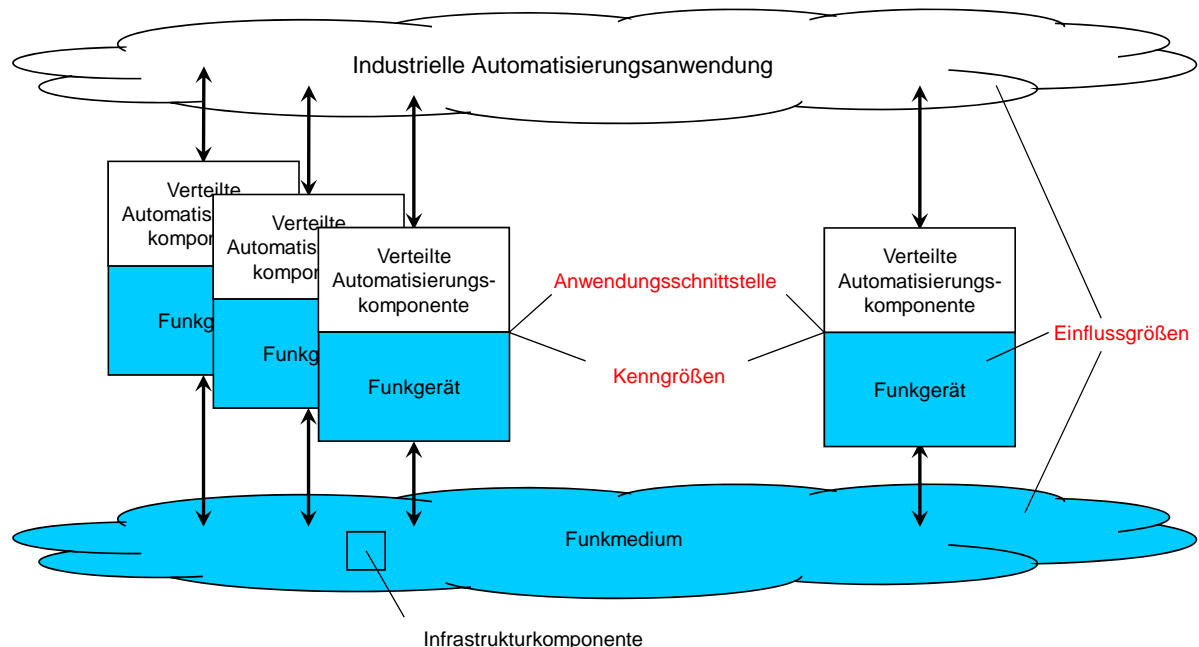


Abbildung 6: Abstraktion des Betrachtungsraums

Das Zeit- und Fehlerverhalten einer konkreten Funklösung (Funkgerät oder Funknetzwerk) sei durch Kenngroßen charakterisiert, deren Werte sich auf die Schnittstelle zwischen Funkgerät und Anwendungskomponente beziehen. Diese Festlegung ist nötig, um eine anwendungsorientierte Bewertung der Funklösung zu ermöglichen. Da Art und Logik der Anwen-

dungsschnittstelle nicht festgelegt sind, muss mit den Kenngrößenwerten eine Spezifikation der Schnittstelle mitgeliefert werden.

- ❖ *Beispiel: Ein Funkgerät bietet der Anwendung die Nutzung einer seriellen Schnittstelle nach RS 485 und eine Ethernet-Schnittstelle. Die Kenngrößenwerte werden sich für die Schnittstellen und für die genutzten Bitraten unterscheiden.*

Die Werte der Zeit- und Fehlerkenngrößen ändern sich mit den Anforderungen der Anwendung, mit der Konfiguration der Funkgeräte und mit den Umgebungsbedingungen.

- ❖ *Beispiel: Große Datenpakete, eine geringe Übertragungsfrequenz und elektromagnetischer Störer werden das Zeit- und Fehlerverhalten ungünstig beeinflussen.*

Das Konzept der Standardtests sieht vor, die industrielle Automatisierungsanwendung durch ein definiertes Verhalten und mithilfe standardisierter Einflussgrößen und Einflussgrößenwerte abzubilden. Das geschieht durch eine Testanwendung, die standardisierte Testfälle abarbeitet (siehe Abbildung 7). Es werden in definierten Intervallen entsprechend der Anwendungsschnittstelle Kommunikationsanforderungen ausgelöst. Anschließend werden die Ereignisse an den Anwendungsschnittstellen genutzt, um die Kenngrößen zu ermitteln, die das Zeit- und Fehlerverhalten des zu testenden Systems charakterisieren.

Die Eigenschaften des Übertragungskanal sollen ebenfalls mit standardisierten Größen und Wertebereichen entsprechend den Standardtestfällen abgebildet werden. Das geschieht mithilfe eines Kanalemulators.

Das zu testende System (System Under Test - SUT) beinhaltet die zu testenden Funkgeräte (Devices Under Test - DUT) und ggf. weitere Infrastrukturkomponenten. Es bedient die definierten Kommunikationsanforderungen eines Testfalls und nutzt zur Übertragung den für diesen Testfall spezifizierten Übertragungskanal.

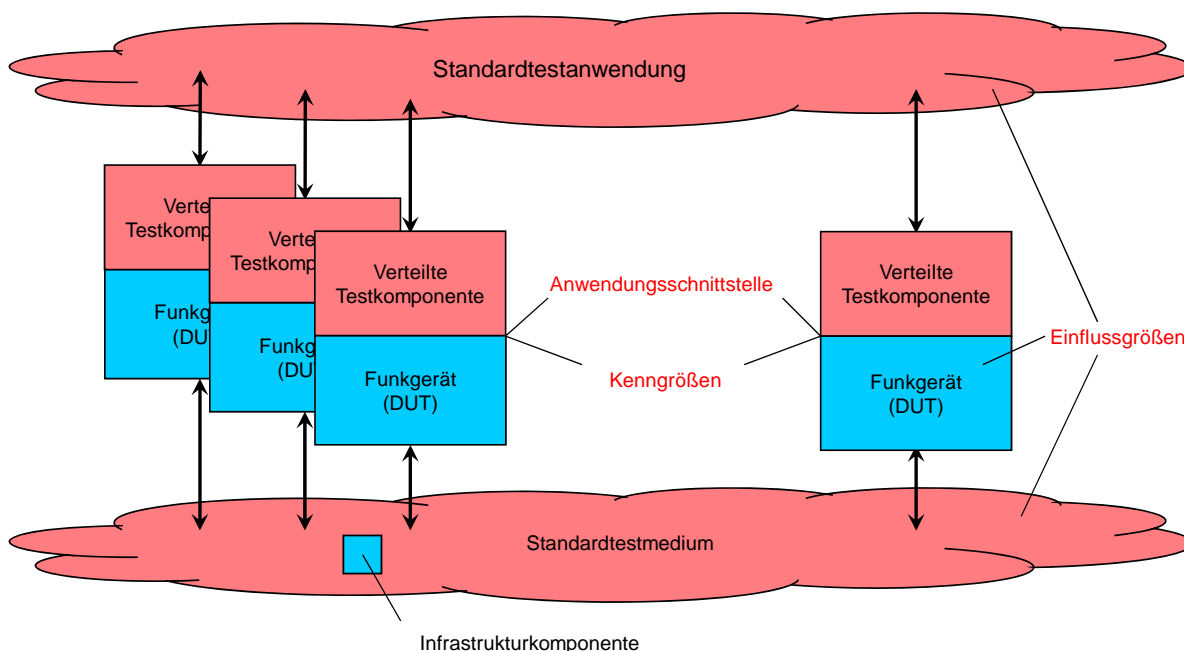


Abbildung 7: Konzept für Standardtests von Funklösungen für die industrielle Automation

Entsprechend diesem Ansatz werden Parameter definiert, um die Anforderungen an die Funkkommunikation sowie die Bedingungen dafür quantitativ beschreiben zu können. Durch die Spezifikation von Werte-Tupel für diese Parameter erfolgt die Spezifikation der Standardtestfälle. Damit können Funklösungen einheitlich und unter reproduzierbaren Bedingungen untersucht werden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird näher auf die erwähnten Parameter eingegangen. Die Ausführungen gründen sich auf Vorarbeiten, bei denen Einflussgrößen auf die industrielle

Funkkommunikation analysiert wurden (s. a. [21]). Die Vorarbeiten wurden in diesem Vorhaben weiterentwickelt und auf die Spezifikation von Standardtestfällen angewendet. Detaillierte Definitionen und Erläuterungen zu den folgenden Ausführungen finden sich in [6].

3.2 Anforderungen und Bedingungen der Anwendung

Anwendungsbezogene Einflussgrößen auf die Funkkommunikation lassen sich verwenden, um die Kommunikationsanforderungen einer Automatisierungsanwendung zu formulieren. Des Weiteren bestimmen diese Einflussgrößen auch gewisse Bedingungen, unter denen das Kommunikationsnetzwerk die Anforderungen erfüllen soll. In Abbildung 8 sind wesentliche Klassen und deren Attribute aufgeführt.

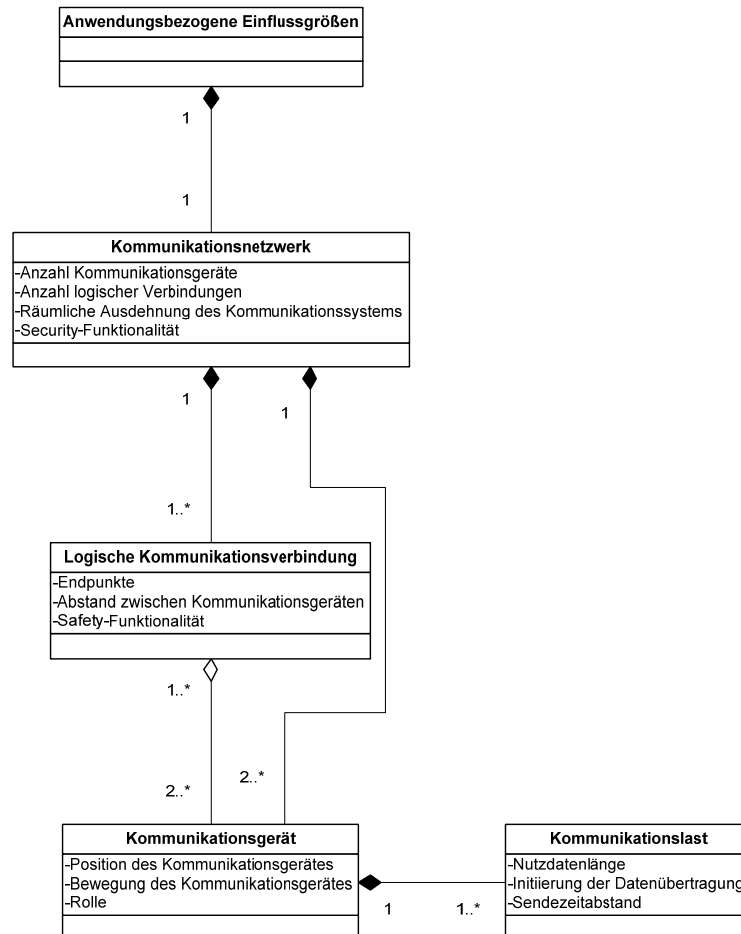


Abbildung 8: Klassifizierung anwendungsbezogener Einflussgrößen

So bestimmt die verteilte Automatisierungsanwendung die Eigenschaften des Kommunikationsnetzwerkes z. B. bezüglich der Anzahl der Kommunikationsteilnehmer, der Anzahl logischer Kommunikationsverbindungen und der maximalen räumlichen Ausdehnung des Kommunikationsnetzes. Eine logische Kommunikationsverbindung ist durch deren Endpunkte (Verteilte Automatisierungskomponenten) und deren maximalen Abstand charakterisiert. Die Kommunikationsgeräte, mit denen die verteilten Automatisierungskomponenten zu verbinden sind, haben eine gewisse Position im Einsatzbereich oder folgen einem Bewegungsprofil.

Jede relevante verteilte Automatisierungskomponente erzeugt eine gewisse Kommunikationslast mit einer bestimmten Charakteristik (z. B. periodisch, zufällig). Daraus ergibt sich die Kommunikationsanforderung an das Funknetzwerk.

3.3 Bedingungen der Anwendungsumgebung

Umweltbezogene Einflussgrößen können genutzt werden, um die Bedingungen der Anwendungsumgebung zu beschreiben (Abbildung 9). Dazu gehören die Charakteristik des Ein-

satzbereiches, die natürlichen Umgebungsbedingungen sowie der Einfluss von Frequenznutzern. Dabei wird unterschieden zwischen Frequenznutzern zur Funkkommunikation und andere Nutzungen elektromagnetischer Wellen, z. B. zur Trocknung von Werkstoffen oder zum Erhitzen.

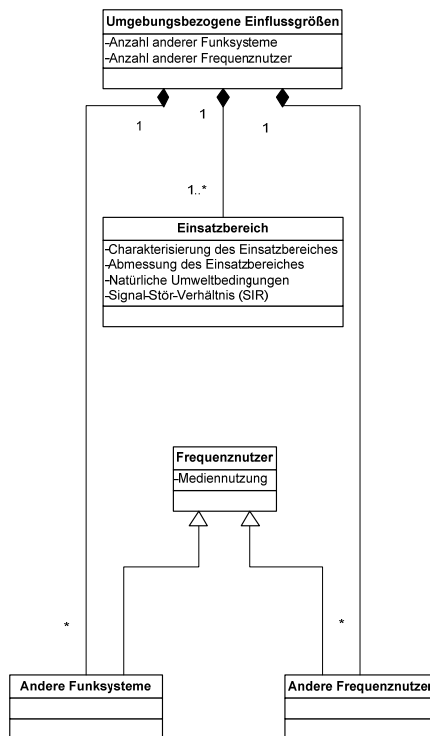


Abbildung 9: Klassifizierung umgebungsbezogener Einflussgrößen

3.4 Einflüsse der Funkgeräte und Funknetzwerke

Die Installation und Konfiguration von Funkgeräten und Funknetzwerken beeinflusst deren Zeit- und Fehlverhalten. In erster Linie müssen die Funkgeräte und Funknetzwerke den Anforderungen und Bedingungen der automatisierungstechnischen Anwendung entsprechen. Das trifft z. B. auf den Abstand von Funkgeräten zu, auf die Umgebungsbedingungen oder auf die Bewegungseigenschaften bei mobilen oder beweglichen Anlagenteilen.

Bezüglich der Funktechnologie, des Funkstandards bzw. der konkreten Funkgeräte bestehen oft mehrere Optionen. Mit der Entscheidung diesbezüglich werden auch die möglichen Topologien festgelegt.

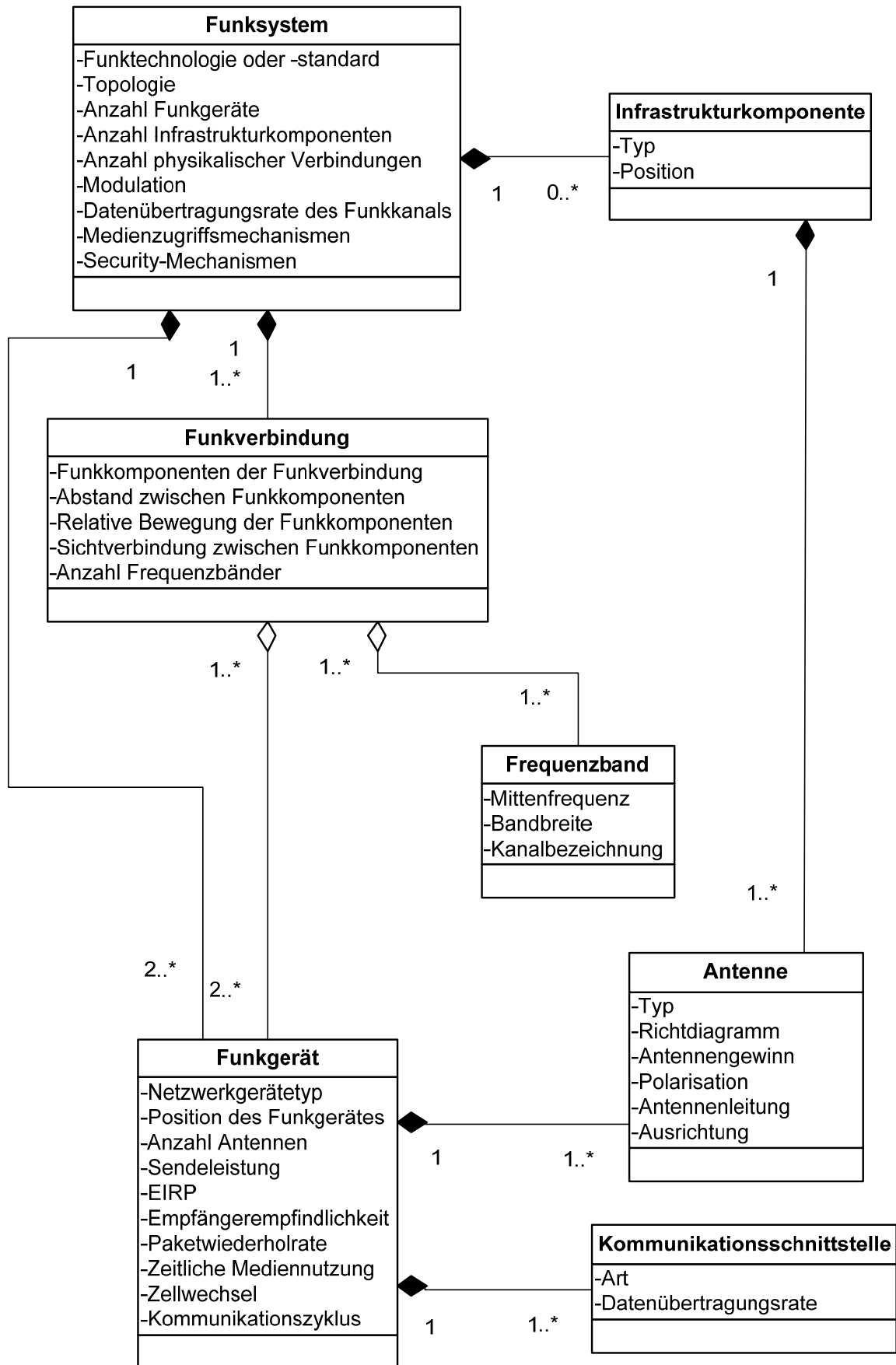


Abbildung 10: Klassifizierung geräte- und systembezogener Einflussgrößen

4 Standardisierte Testfälle zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens

4.1 Anwendungsprofile

4.1.1 VDI/VDE Guideline 2185

Die VDI/VDE-Richtlinie 2185 ([26]) war die erste Veröffentlichung, welche die Anforderungen und Bedingungen an drahtlose Kommunikationssysteme in der industriellen Automation umfassend beschrieben hat. In einem ersten Ansatz werden die grundlegenden Anforderungen in Bezug auf die Ebenen der Automatisierungspyramide spezifiziert (siehe Abbildung 11). Des Weiteren enthält sie die qualitative Beschreibung folgender Parameter:

- Verfügbarkeit,
- Redundanz,
- Typischer Datenverkehr,
- Sicherheit,
- Echtzeitdatenübertragung,
- Typische Datenlänge,
- Bandbreite,
- Anzahl von Stationen,
- Typen von Stationen,
- Abstand,
- EMC Anforderungen.

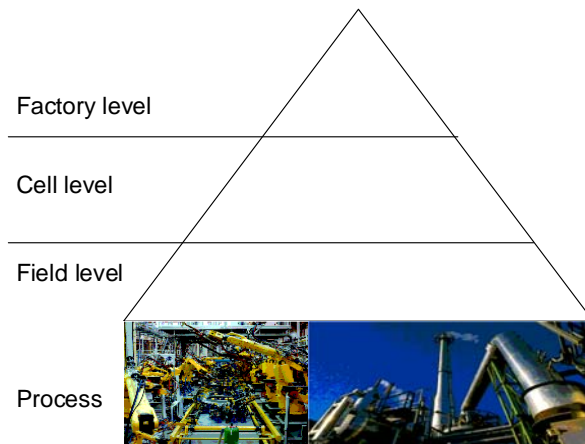


Abbildung 11: Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide [26]

Dieser Ansatz definiert die Bedingungen, welche die drahtlose Kommunikation beeinflussen, nur ungenau. Es existiert keine zahlenmäßige Festlegung von Performanceanforderungen. Deshalb ist eine zahlenmäßige Bewertung von drahtlosen Lösungen in Bezug auf diese Automatisierungsebenen unmöglich.

Zusätzlich zu den Automatisierungsebenen werden in [26] verschiedene Automatisierungsbranchen betrachtet:

- Prozessautomation,
- Infrastrukturanlagen (Klärwerke),
- Gebäudeautomation,
- Fabrikautomation und
- Logistik/Transport.

Für diese Ebenen der Automatisierung werden folgende Anforderungen zusammengefasst:

- Topologie,
- Abstand,
- Zykluszeit,
- Anzahl von Stationen,
- Nutzdaten,
- Bereich für mobile Stationen,
- Geschwindigkeit,
- Ort,

- EMC (durch Interferenzen zu anderen Systemen),
- EMC (Interferenzen von anderen Systemen),
- Verschlüsselung,
- Abfangunterdrückung,
- Zuverlässigkeit,
- Stationsfehler,
- Energieversorgung,
- Kosten für Komponenten,
- Lizenzen,
- Netzwerkprovidergebühren.

Einige der Anforderungen haben quantitative Festlegungen.

Trotzdem ist dies nur ein mäßiger Ansatz, da die aktuelle Version der Richtlinie noch nicht zu einem Abschluss gebracht wurde. Einige Parameter, die die Bedingungen beschreiben, fehlen. Die Kommunikationsanforderungen der Anwendung sind nicht vollständig quantifiziert. Deshalb können die Bedingungen für standardisierte Testfälle für die genannten Anwendungsbranchen nicht formal spezifiziert werden. Die Richtlinien dienen lediglich der Auswahl einer geeigneten drahtlosen Technologie für einen bestimmten Anwendungsfall. Allerdings wird eine Methode zur standardisierten Bewertung einer drahtlosen Lösung in Bezug auf die Anwendungsbranchen nicht beschrieben.

4.1.2 ISA 100

In [16] werden die Ergebnisse einer Analyse von industriellen drahtlosen Kommunikationsanwendungen präsentiert. Dementsprechend werden solche Kommunikationsanwendungen in sechs Klassen aufgeteilt. Diese Klassen werden den folgenden Kategorien zugeordnet:

- Sicherheit,
- Regelung und
- Monitoring.

Die Kategorie „Sicherheit“ beinhaltet die Anwendungsklasse 0 „Notfallmaßnahmen“. Diese Klasse wird in [16] auf Seite 8 wie folgt beschrieben:

„Diese Klasse beinhaltet sicherheitsrelevante Maßnahmen, die kritisch für beides sind: Personal und Anlage. Die meisten Sicherheitsfunktionen sind und werden durch reservierte drahtgebundene Netzwerke erfüllt, um Fehlerformen und Anfälligkeiten gegenüber externen Ereignissen oder Attacken einzuschränken. Beispiele sind Sicherheitssperren, Notfallabschaltungen und Brandschutz.“

Die Kategorie „Regelung“ kombiniert die drei Klassen „Geschlossener Regelungskreis“, „Geschlossener Überwachungsregelkreis“ und „Offener Regelkreis“. Klasse 1 „Geschlossener Regelungskreis“ wird in [16] auf Seite 8 wie folgt beschrieben:

„Diese Klasse enthält Motor- und Achsenregelungen sowie primäre Durchfluss- und Druckregelungen.“

Klasse 2 „Geschlossener Überwachungsregelkreis“ wird in [16] auf Seite 8 wie folgt beschrieben:

„Diese Klasse von geschlossenen Regelkreisen hat normalerweise große Zeitkonstanten, mit einer Kommunikationsaktualität im Bereich von Sekunden bis Minuten. Beispiele sind Batch-einheiten und Werkzeugauswahl.“

Klasse 3 „Offener Regelkreis“ wird in [16] auf Seite 7 wie folgt beschrieben:

„Diese Klasse beinhaltet Aktionen, bei denen ein Operator, eher als eine Maschine, den Kreis zwischen Ein- und Ausgang schließt. Solche Aktionen können das Herausnehmen von Einheiten beinhalten, wenn die Bedingungen darauf hinweisen. Die Aktualität für diese Klasse von Aktionen entspricht einer menschlichen Skala, gemessen in Sekunden bis Minuten.“

Abschließend beinhaltet die Kategorie „Monitoring“ zwei Klassen, „Monitoring mit kurzzeitigen Konsequenzen für den Betrieb“ und „Monitoring ohne kurzzeitige Konsequenzen für den Betrieb“. Klasse 4 „Monitoring mit kurzzeitigen Konsequenzen für den Betrieb“ wird in [16] auf Seite 7 wie folgt beschrieben:

„Diese Klasse beinhaltet obere und untere Alarmer und andere Informationen, welche weitere Überprüfungen oder Ausführungen eines Wartungstechnikers auslösen könnten. Die Aktualität für diese Klasse ist typischerweise niedrig (langsam) und wird in Minuten oder sogar Stunden gemessen.“

Klasse 5 „Monitoring ohne kurzzeitige Konsequenzen für den Betrieb“ wird in [16] auf Seite 7 wie folgt beschrieben:

„Diese Klasse enthält Elemente ohne starke Aktualitätsanforderungen. Einige, wie die Aufzeichnung der Abfolge von Ereignissen, benötigen eine hohe Zuverlässigkeit; andere, wie die Aufzeichnung von langsam veränderlichen Informationen mit niedrigem ökonomischen Wert, müssen nicht so zuverlässig sein, da der Verlust von einigen aufeinanderfolgenden Abtastwerten unwichtig sein dürfte.“

Neben der textuellen Beschreibung der Anwendungsklassen merkt das Dokument an, dass die Wichtigkeit einer Nachricht und die Aktualität von Klasse 5 zu Klasse 0 ansteigt.

Diese Klassifizierung gibt einen groben Eindruck von Applikationen mit unterschiedlichen Kommunikationsanforderungen. Jedoch wird nicht erwähnt, dass sich solche Anwendungsklassen auch in den Begrifflichkeiten der Bedingungen, wie der Abstand zwischen den Geräten oder die Anzahl von Geräten in einem Netzwerk, unterscheiden. Deshalb können die genannten Beschreibungen nicht zur Ableitung von Testfällen zur Bewertung drahtloser Lösungen in Bezug auf ihre Eignung für bestimmte Anwendungsklassen herangezogen werden.

4.1.3 NAMUR-Empfehlung NE 124

Das Ziel dieser NAMUR-Empfehlung ist die Festlegung von Anforderungen für drahtlose Standards in der Prozessindustrie. In Bezug auf die Anwendungsfelder wurden die folgenden drei Applikationsklassen definiert:

- Anwendungsklasse A (Funktionale Sicherheit),
- Anwendungsklasse B (Prozessmanagement/Regelung) und
- Anwendungsklasse C (Anzeige/Monitoring).

Diese Anwendungsklassen werden formlos, d. h. in einfacher Sprache, beschrieben. Der Ansatz ist sinnvoll für die Bestimmung des Dokumentes. Jedoch werden keine formalen Festlegungen der Anwendungsklassen bereitgestellt. Das bedeutet, dass keine standardisierten Testbedingungen von diesen Definitionen abgeleitet werden können.

4.1.4 Erläuterung der FITS-Anwendungsprofile

Ein Anwendungsprofil beschreibt die Anforderungen einer Applikation an die Kommunikation.

Das Ziel des FITS-Projektes ist die Definition von Standardtestfällen für industrielle drahtlose Lösungen. Experten haben bestätigt, dass industrielle Anwendungen sehr unterschiedlich sind und deshalb drahtlose Lösungen mit unterschiedlichen Übertragungscharakteristiken ihre Daseinsberechtigung haben. Aus diesem Grund müssen Standardtestfälle die unterschiedlichen Anforderungen der industriellen Anwendungen berücksichtigen.

In der VDI/VDE-Richtlinie werden unterschiedliche Automatisierungsfelder wie Fabrik- und Prozessautomation berücksichtigt. Die ISA 100 definiert fünf Anwendungsklassen, welche im

Gründe für alle in der VDI/VDE-Richtlinie aufgelisteten Automationsbranchen relevant sind. Allerdings existiert neben der Beschreibung, was Sicherheit, Regelung oder Monitoring bedeutet, keine quantitative Definition. Deshalb sind auch keine Testfälle von diesen Definitionen ableitbar. Die NAMUR-Empfehlung definiert drei Anwendungsklassen für die Prozessautomation, aber wiederum ohne quantitative Angaben. Im Projekt FITS wird ein Ansatz entwickelt, welcher alle drei genannten Dokumente berücksichtigt.

Der Ausgangspunkt dieses Ansatzes ist die Definition von Einsatzgebieten. Hier folgen wir dem NAMUR-Ansatz und unterscheiden zwischen Sicherheit, Regelung und Monitoring.

Da das Thema des Projektes die Entwicklung von Standardtestfällen für industrielle drahtlose Lösungen ist, liegt der Fokus auf dem System-Under-Test, also der drahtlosen Lösung. Weiterhin sind die Testfälle ein Kompromiss zwischen der Abbildung der gewünschten Kommunikationsanforderungen der Anwendung auf der einen Seite und der Umsetzbarkeit der Testfälle auf der anderen Seite.

Ein Anwendungsprofil ist durch die Anforderungen einer Gruppe von Anwendungen definiert. Dabei soll das Anwendungsprofil auch nur durch ein drahtloses Kommunikationssystem bedient werden. In FITS werden folgende Anwendungsprofile festgelegt:

- Maschine,
- Fabrikhalle,
- Prozessanlage, und
- Spezialanwendungen (z. B. Fahrstuhl).

Im Folgenden werden die Einflussgrößen bzw. Bedingungen, welche für die genannten Anwendungsprofile von Bedeutung sind, definiert und erläutert.

4.1.4.1 Anzahl an Kommunikationsgeräten

Die Anzahl der Kommunikationsgeräte beschreibt, wie viele Schnittstellen es aus Sicht der Anwendung zum Kommunikationssystem gibt. Die Festlegung der tatsächlich erforderlichen Anzahl an Funkgeräten in der Systemspezifikation erfordert Aspekte der automatisierungstechnischen Anwendung und der Funkkommunikation. Die Anzahl an Kommunikationsgeräten bestimmt die **Gesamtkommunikationsanforderungen**, die von einem Kommunikationssystem zu bedienen sind.

4.1.4.2 Räumliche Ausdehnung des Kommunikationssystems

Mit der räumlichen Ausdehnung des Kommunikationssystems werden die Länge, Breite und die Höhe des Bereiches angegeben, in welchem die Kommunikationsgeräte installiert sind. Die räumliche Ausdehnung ergibt sich aus den Positionen der Kommunikationsgeräte. Diese Angaben ermöglichen eine Abschätzung der **maximalen Übertragungsentfernung** zwischen den Kommunikationsgeräten und zusammen mit der Anzahl an Kommunikationsgeräten der **Gerätedichte**. Damit lässt sich z. B. beim Einsatz von Routing-Mechanismen auf die Anzahl der notwendigen Hops schließen. Außerdem ist die Knotendichte ein Indiz für die **Mediennutzung** an einem Ort.

4.1.4.3 Abstand zwischen den Kommunikationsgeräten

Die Entfernung zwischen zwei Kommunikationsgeräten, zwischen denen eine logische Verbindung besteht, wird als deren Abstand definiert. Dabei wird der dreidimensionale Raum zugrunde gelegt. Diese Einflussgröße bestimmt die Anforderung an die **Übertragungsentfernung**. Aus Sicht der Anwendung spielt es dabei keine Rolle, ob die Übertragungsentfernung direkt überbrückt wird oder ob eine Basisstation bzw. ein Router zur Übertragung genutzt werden.

4.1.4.4 Bewegung der Kommunikationsgeräte

Zunächst ist von Interesse, ob es sich um ein mobiles Kommunikationsgerät handelt und mit welcher Geschwindigkeit zu rechnen ist. Die Bewegung eines Kommunikationsgerätes kann durch den Startpunkt und die Bahn in einem Raumkoordinatensystem beschrieben werden. Der Koordinatenursprung ist für das gesamte Kommunikationssystem einheitlich festgelegt und damit als Referenzpunkt für alle Kommunikationsgeräte gleichermaßen gültig. Mithilfe mathematischer Funktionen lassen sich Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit beschreiben. Die Bewegung und Geschwindigkeit eines Kommunikationsgerätes bestimmt die relative Bewegung und Geschwindigkeit zum Kommunikationspartner. Durch die Bewegung kommt zur zeitlichen **Änderung der Ausbreitungsbedingungen** noch eine örtlich veränderliche Komponente. Zusätzlich kann der Dopplereffekt zum Tragen kommen.

4.1.4.5 Nutzdatenlänge

Als Nutzdatenlänge wird die Anzahl der Oktett bezeichnet, die an der Kommunikationsschnittstelle zwischen Automatisierungstechnischer Anwendung und Kommunikationsmodul als Nutzerdaten ausgetauscht werden. Die Nutzdatenlänge wird in erster Linie von der Anwendung bestimmt, kann aber auch z. B. im Falle von Ethernet als Kommunikationsschnittstelle durch diese beeinflusst werden (Minimum 64 Oktett).

4.1.4.6 Initiierung der Datenübertragung

Hier wird angegeben, ob die Anwendung eine Kommunikationsanforderung zyklisch, ereignisgesteuert oder stochastisch initiiert. Davon unabhängig ist, wie eine Funklösung die Übertragung auf dem Funkmedium initiiert.

4.1.4.7 Sendezeitabstand

Als Sendezeitabstand wird die Zeitdifferenz bezeichnet, nach der die Automatisierungsanwendung Nutzdaten an die Kommunikationsschnittstelle übergibt. Bei zyklischer Übertragung kann man von einem Anwendungszyklus sprechen. Bei ereignisgesteuerter Übertragung ist der minimal mögliche Wert zwischen zwei Übertragungsanforderungen von Interesse. Erfolgt die Initiierung nach einem stochastischen Prozess, sind die entsprechenden Parameter der Verteilungsfunktion anzugeben.

4.1.4.8 Sichtkontakt

Der Sichtkontakt ist eine Einflussgröße der Umgebung und kann als Ergebnis von AP 2 durch RF-Parameter beschrieben werden. Mit dieser Einflussgröße wird angegeben, ob Sichtverbindung zwischen den Funkkomponenten

- besteht (Line of Sight - LOS),
- nicht besteht (Non Line of Sight - NLOS) oder
- gegebenenfalls gestört ist (Obstructed Line of Sight - OLOS).

Die Störung bei OLOS ergibt sich insbesondere dadurch, dass Hindernisse in die Fresnelzone des Funkkanals hineinragen. Bei beweglichen Hindernissen oder beweglichen Funkkomponenten kann der Wert dieser Einflussgröße auch dynamisch sein. Durch permanente oder temporäre Behinderung der Signalausbreitung kann das **Zeitverhalten** beeinflusst werden. Es kann zu Übertragungswiederholungen oder zum Wechsel von Übertragungswegen z. B. durch dynamisches Routing kommen.

4.1.4.9 Andere Funkkommunikationssysteme

Andere Funkkommunikationssysteme sind eine Einflussgröße der Umgebung und können als Ergebnis von AP 2 durch RF-Parameter beschrieben werden. Diese Einflussgröße beschreibt, wie viele Funkkommunikationssysteme neben dem betrachteten in dessen Einflussgebiet aktiv sind. Man spricht auch von Systemdichte, die die **Übertragungsqualität** des betrachteten Funksystems stören kann.

4.1.4.10 Andere Frequenznutzer

Andere Frequenznutzer gelten als eine Einflussgröße der Umgebung und können als Ergebnis von AP 2 durch RF-Parameter beschrieben werden. Diese Einflussgröße beschreibt, wie viele andere Frequenznutzer neben dem betrachteten Funksystem in dessen Einflussgebiet aktiv sind. Andere Frequenznutzer können beispielsweise Anwendungen sein, die Hochfrequenzstrahlung zum Trocknen oder Schweißen einsetzen, aber auch Frequenzumrichter, Funkenerodiermaschinen und elektrische Antriebe. Die **Übertragungsqualität** des betrachteten Funksystems kann durch solche Frequenznutzer gestört werden.

4.1.4.11 Einsatzbereich

Der Einsatzbereich ist eine Einflussgröße der Umgebung und kann als Ergebnis von AP 2 durch RF-Parameter beschrieben werden. Er gibt an, ob das Kommunikationssystem

- innerhalb von Gebäuden (Indoor),
- außerhalb von Gebäuden (Outdoor) oder
- teilweise innerhalb und teilweise außerhalb von Gebäuden (Indoor/Outdoor)

zum Einsatz kommt. Im Indoor-Bereich sind zusätzliche Angaben sinnvoll, ob die Kommunikation in einer Maschine, Fertigungszelle und/oder in einer Halle stattfindet. Auch Kombinationen sind möglich.

Mithilfe von technischen Zeichnungen, Skizzen oder Fotos kann mehr oder weniger genau die Ausgangsbasis zur Beurteilung der **Ausbreitungsbedingungen** bereitgestellt werden. Angaben zu Hindernissen und Reflexionsflächen sind ebenfalls hilfreich.

4.1.5 Übersicht über die FITS-Anwendungsprofile

In Tabelle 4 werden den eingeführten Einflussgrößen zur Festlegung der Anwendungsprofile konkrete Werte zugewiesen.

Tabelle 4: Anwendungsprofile

Einflussgröße (anwendungsbezogen)	Maschine	Fabrikhalle	Prozess- anlage (Outdoor)	Prozess- anlage (Indoor)	Spezielle Applikation (Lift)
Anzahl an Kommunikationsgeräten	16	50	100	100	2
Räumliche Ausdehnung des Kommunikationssystems (L x B x H)	5 m x 5 m x 5 m	100 m x 25 m x 10 m	500 m x 500 m x 15 m	100 m x 25 m x 15 m	3 m x 3 m x 25 m
Abstand zwischen den Kommunikationsgeräten	10 m	100 m	700 m	100 m	25 m
Bewegung der Kommunikationsgeräte	0 m/s, 5 m/s	1,5 m/s	0	0	2,5 m/s
Nutzdatenlänge	2 Octet	64 Octet	20 Octet	20 Octet	2 Octet
Initiierung der Datenübertragung	periodic	periodic	periodic	periodic	periodic
Sendezeitabstand	100 ms	250 ms	4 s	4 s	50 ms
Sichtkontakt	NLOS	NLOS	NLOS, OLOS	NLOS, OLOS	OLOS
Delay Spread					
Dämpfung					

4 Standardisierte Testfälle zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens

Andere Funkkommunikationssysteme	WLAN	WLAN	WLAN	WLAN	WLAN
Medienbelegung (benachbarter Kanal)	1518 octet / 1,8 ms	1518 octet / 1,8 ms	1518 octet / 1,8 ms	1518 octet / 1,8 ms	1518 octet / 1,8 ms
SIR					
Andere Frequenznutzer					
Zeitverhalten					
SIR					
Einsatzbereich	Indoor	Indoor	Outdoor	Indoor	Indoor

Influencing Parameter (Application related)	Machine z. B. Bluetooth, WISA	Factory hall z. B. WLAN	Process plant (Outdoor) z. B. Trusted Wireless	Process plant (Indoor) z. B. ZigBee, Wireless HART	Special appl. (Lift) z. B. Bluetooth
Anzahl an Kommunikationsgeräten	Emulation der Gerätedichte durch VSG mit Kommunikation mit einem DUT Für WISA: VSG	Emulation der Gerätedichte durch VSG ohne Kommunikation mit den DUT durch reine Sendung	nicht relevant	Emulation der Gerätedichte durch VSG ohne Kommunikation mit den DUT durch reine Sendung	
Infrastrukturkomponenten	Anschluss Master Device an KEM	Anschluss AP an KEM	Anschluss Repeater Device an KEM	Anschluss Routing Device an KEM	
Antennencharakteristik	abgedeckt durch Kanalmodell, bei internen Antennenutzung der Messbox Für WISA: Antennen Diversität und parallele Frequenzkanalnutzung	Antennen Diversität: Nachweis, dass Interferer die entscheidene Einflussgröße ist gegenüber den reinen Ausbreitungsbedingungen ggf. mit professionellen (preisintensiven) Kanal- emulatoren, Einsatzcharakteristik unklar	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell, bei internen Antennen Nutzung der Messbox	
Räumliche Ausdehnung des Kommunikationssystems (L x B x H)	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	

4 Standardisierte Testfälle zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens

Abstand zwischen den Kommunikationsgeräten	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	
Bewegung der Kommunikationsgeräte	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell Roaming: Anschluss AP an KEM Anpassung des Anwendungsmodells an drei DUT (Client, AP1, AP2)	nicht relevant	abgedeckt durch Kanalmodell	
Nutzdatenlänge	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	
Initiierung der Datenübertragung	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	
Sendezeitabstand	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	abgedeckt durch Anwendungsmodell	
Sichtkontakt					
Delay Spread	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	
Dämpfung	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	
Andere Funkkommunikationssysteme	1. Variante VSG als reinen Sender 2. Variante reale WLAN-Geräte-Kommunikation wird eingekoppelt (zu beachten: Bidirektionalität der Signalübertragung, MIMO)	1. Variante VSG als reinen Sender 2. Variante reale WLAN-Geräte-Kommunikation wird eingekoppelt (zu beachten: Bidirektionalität der Signalübertragung, MIMO)	1. Variante VSG als reinen Sender 2. Variante reale WLAN-Geräte-Kommunikation wird eingekoppelt (zu beachten: Bidirektionalität der Signalübertragung, MIMO)	1. Variante VSG als reinen Sender 2. Variante reale WLAN-Geräte-Kommunikation wird eingekoppelt (zu beachten: Bidirektionalität der Signalübertragung, MIMO)	
Medienbelegung (benachbarte Kanäle)					
SIR					

Andere Frequenznutzer	mit VSG	mit VSG	mit VSG	mit VSG	
Zeitverhalten					
SIR					
Einsatzbereich	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	abgedeckt durch Kanalmodell	

4.2 Testfallbeschreibung

4.2.1 Definition von Kenngrößen

- Übertragungszeit:** Die Übertragungszeit (Transmission Time) ist eine grundlegende Kenngröße, die zur Bewertung von Verfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit einer Funklösung herangezogen werden kann. Dabei ist von Interesse, wie lange die Übertragung eines Nutzdatums vom Producer (z. B. einem Sensor) bis zum Consumer (z. B. eine Steuerung) dauert. Ein einheitliches Verständnis dieser Zeitspanne erfordert die genaue Festlegung des Starts der Messung und deren Ende. Gemäß [9] ist die Übertragungszeit der Zeitabschnitt von der Übergabe des ersten atomaren Bestandteils der Nutzdaten (Bit, Oktet) an der Schnittstelle zwischen Anwendung und Funkkommunikation eines Producers und der Übergabe des letzten atomaren Bestandteils derselben Nutzdaten an der Schnittstelle zwischen Funkkommunikation und Anwendung eines Consumers (siehe Abbildung 12). Die Art der Schnittstelle zwischen Funkkommunikation und Anwendung sowie deren Charakteristik ist bei der Veröffentlichung der Kenngrößenwerte immer mit anzugeben, da es keine einheitliche Anwendungsschnittstelle gibt.

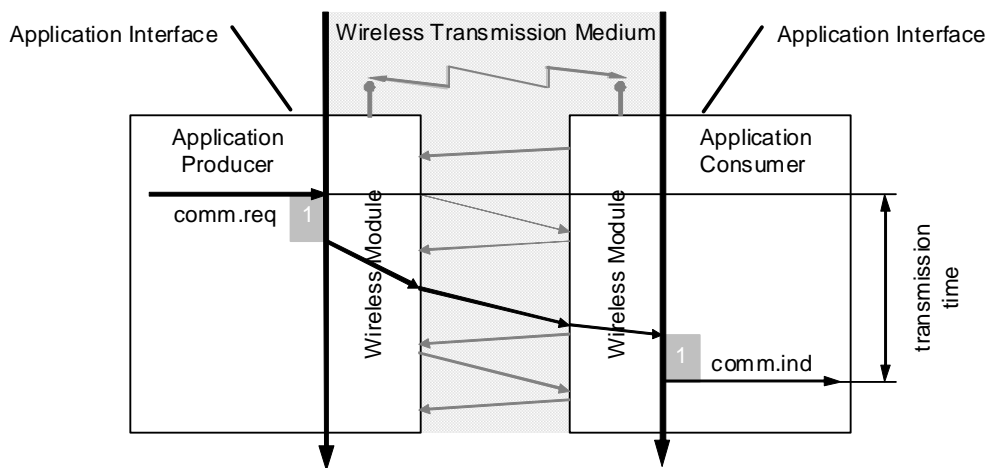


Abbildung 12: Definition der Übertragungszeit

Dieser Definition folgend, können die in Tabelle 5 aufgelisteten Zeitabschnitte der Übertragungszeit unterschieden werden.

Tabelle 5: Zeitabschnitte, die den Übertragungszeitwert mit bestimmen

Parameter	Abhängigkeit		Anmerkung
Laufzeit Anwendungsschnittstelle	Funkmodul n	t_{ai}	Die Datenübertragung zwischen Anwendungsmodul und Kommunikationsmodul kann den Übertragungszeitwert bedeutend beeinflussen. Der Maximalwert hängt von der Art der Schnittstelle, deren Einstellungen und der Implementierung ab.
Laufzeit der Funkmodulimplementierung	Funkmodul n	t_i	Die Implementierung des Funkmoduls kann den Übertragungszeitwert bedeutend beeinflussen. Der Maximalwert hängt von der Technologie und deren Einstellungen sowie von der Implementierung ab.
Funkübertragungszeit	Verbindung i	t_w	Die Zeit, die für die Funkübertragung benötigt wird, hängt von der Nutzdatenlänge und der Bitrate ab. Außerdem wird diese Zeit durch die Funktechnologie bestimmt, durch die genutzte Frequenz, Bandbreite, Modulation, Codierung usw. Diese Zeit berücksichtigt auch technologieabhängige Protokoll-Overheads einer Übertragung, wie feste Pausen- oder Wartezeiten oder die Zeiten zur Übertragung von Telegrammrahmen.
Technologievariable Sende- und Empfangszeit	Übertragung j	t_{tv}	Die Technologievariable beinhaltet alle technologieabhängigen Protokoll-Overheads, die bei jeder Übertragung einen anderen Wert haben können. Dazu gehören die Wartezeit auf einen freien Kanal, oder die Back-off-Zeit. Bei einigen Technologien ist ein Acknowledgment erforderlich, um die Übertragung abzuschließen.
Wiederholzeit	Übertragung j, Protokollschicht	t_r	Wenn eine Übertragung gestört wurde, wird sie üblicherweise wiederholt. Das kann in verschiedenen Protokollschichten unterschiedlich häufig geschehen. Die maximale Wiederholzeit hängt von der Dauer einer Störung ab, von der maximal vorgesehenen Anzahl an Wiederholungen sowie von Warte- und Back-off-Zeiten.

Die in Tabelle 5 dargestellten Zeitabschnitte beeinflussen in sehr unterschiedlicher Art und Weise die Werte der Übertragungszeit. Sie können zur Analyse der Übertragungszeit herangezogen werden. Für die Bewertung einer Funklösung aus Anwendungssicht ist allerdings lediglich die Gesamtzeit von Interesse.

Die Übertragungszeit eignet sich als Kenngröße der Echtzeitfähigkeit besonders für Anwendungen mit aperiodischem Kommunikationsbedarf. Unabhängig vom zeitlichen Abstand zweier Übertragungen kann der Zeitpunkt der Bereitstellung der Nutzdaten am Consumer bewertet werden. Außerdem wird die Übertragungszeit zur Bewertung der Zuverlässigkeit herangezogen.

- **Aktualisierungszeit:** Die Aktualisierungszeit (Update time) entspricht im Idealfall dem Sendezeitintervall (siehe Abbildung 13). Das heißt, die übertragenen Nutzdaten werden an der Anwendungsschnittstelle des Consumer in denselben zeitlichen Abständen übernommen, wie sie an der Anwendungsschnittstelle des Producer übergeben wurden. Die Aktualisierungszeit ist definiert als der Zeitabschnitt von der Übergabe des letzten atomaren Bestandteils der Nutzdaten eines Producer an der Anwendungsschnittstelle eines Consumer bis zur Übergabe des letzten atomaren Bestandteils der unmittelbar nachfolgend übertragenen Nutzdaten vom gleichen Producer.

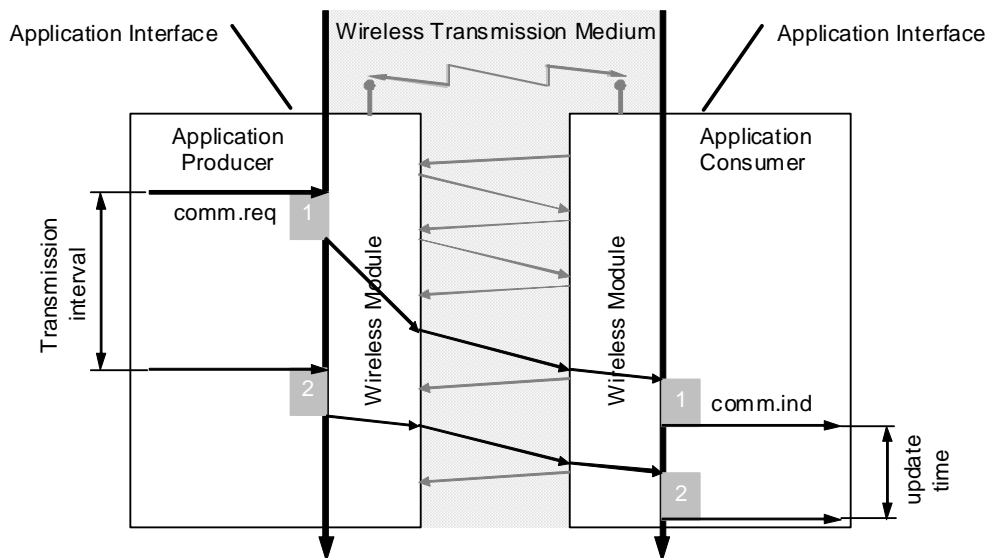


Abbildung 13: Definition der Aktualisierungszeit

Die Aktualisierungszeit ist besonders für die Bewertung der Echtzeitfähigkeit von Anwendungen mit periodischem Kommunikationsbedarf geeignet.

- Anlaufzeit:** Für die Bestimmung der Anlaufzeit (Start-up time) wird eine weitere Schnittstelle der Funklösung herangezogen, die Spannungsversorgung. Die Anlaufzeit wird definiert als die Zeitspanne zwischen dem Einschalten der Funklösung bzw. der Auslösung einer Reset-Funktion und dem Erreichen eines eingeschwungenen Zustands.

Das Starterereignis für die Messung beim Einschalten der Funklösung ist das Erreichen des stationären Wertes der Nennspannung an Producer und Consumer. Bei Auslösung einer Reset-Funktion ist von der Funklösung ein Startsignal für das Testsystem bereitzustellen.

Als eingeschwungener Zustand wird definiert, dass 10 Pakete korrekt an der Anwendungsschnittstelle des Consumer übergeben worden sind.

Die Anlaufzeit wird zur Bewertung der Echtzeitfähigkeit herangezogen.

- Anzahl korrekt empfangener Pakete:** Ein Paket p_{Rxi} gilt zunächst als empfangen, wenn es an der Anwendungsschnittstelle des Consumer an die Anwendung übergeben wurde. Da es allerdings zu Verfälschungen des Inhalts und zu Paketwiederholungen kommen kann, die nicht durch die Fehlersicherungsmechanismen der Funklösung identifiziert und beseitigt werden, sind die empfangenen Pakete daraufhin zu prüfen. Außerdem gehört die Rechtzeitigkeit zu den Bedingungen eines korrekt empfangenen Paketes. Deshalb werden bei der nachfolgend aufgeführten Bestimmung der korrekt empfangenen Pakete der Dateninhalt (Data content: DC), die Reihenfolge (Sequence number: SN) und die Übertragungszeit t_{TT} eines empfangenen Paketes berücksichtigt.

$$N_{Rx} = \sum_{i=1}^{N_{Tx}} c(p_{Rxi}) \text{ mit } \begin{cases} c(p_{Rxi}) = 1, DC(p_{Rxi}) = DC(p_{Tx_i}) \wedge SN(p_{Rxi}) > SN(p_{Rxi-1}) \wedge t_{TT}(p_{Rxi}) \leq t_{TTmax} \\ c(p_{Rxi}) = 0, \text{sonst} \end{cases} \quad (1)$$

N_{Rx} bezeichnet demzufolge die Anzahl korrekt empfangener Pakete, für die gilt:

- Der Dateninhalt stimmt mit dem Dateninhalt des gesendeten Paketes überein. Es liegen keine Bitfehler bzw. Symbolfehler vor.

- Die Reihenfolge der empfangenen Pakete muss mit der Reihenfolge der gesendeten Pakete identisch sein. Überholte Pakete werden somit als Verlust gewertet.
- Die Übertragungszeit muss kleiner als eine maximale Übertragungszeit sein.

Die Anzahl korrekt empfangene Pakete wird zur Bewertung der Verfügbarkeit bzw. der Paketverlustrate herangezogen.

- **Anzahl verlorener Pakete:** Der triviale Fall dafür, dass ein Paket als verloren gilt, ist, dass ein an der Anwendungsschnittstelle des Producer übergebenes Paket nicht an der Anwendungsschnittstelle des Consumer übergeben wird. Allerdings gilt im Rahmen dieser Betrachtung auch ein empfangenes Paket p_{Rxi} als verloren, wenn dessen Übertragungszeit t_{TT} über einem definierten Maximalwert t_{TTmax} liegt. Des Weiteren wird bei Paketvertauschungen das verspätete Paket als Verlust gewertet, selbst wenn es den Maximalwert t_{TTmax} nicht überschritten hat.

Die Anzahl verlorener Pakete (Number of lost packets: N_{PL}) ergibt sich damit wie folgt:

$$N_{PL} = \sum_{i=1}^{N_{Tx}} l(p_{Rxi}) \text{ mit } \begin{cases} l(p_{Rxi}) = 1, t_{TT}(p_{Rxi}) > t_{TTmax} \\ l(p_{Rxi}) = 1, \sum_{j=1}^i t_{TI}(p_{Rkj}) < \sum_{k=1}^{i-1} t_{TI}(p_{Rkk}) \\ l(p_{Rxi}) = 0, \text{sonst} \end{cases} \quad (2)$$

Die Anzahl verlorener Pakete wird zur Bewertung der Verfügbarkeit bzw. der Paketverlustrate herangezogen.

- **Verfügbarkeit:** Wie bereits oben ausgeführt, ist die Verfügbarkeit (Availability: A) ein Maß für die Fähigkeit einer Einheit, während eines gegebenen Zeitintervalls eine geforderte Funktion zu erfüllen. Angewandt auf die Funktion einer Funklösung, ist die Verfügbarkeit (Availability: A) das Verhältnis der Zeit der fehlerfreien Datenübertragung (Uptime: t_U) zu einem Betrachtungszeitraum (Observation time: t_O):

$$A = \frac{t_U}{t_O} \quad (3)$$

Unter der Annahme, dass der Producer im Betrachtungszeitraum t_O eine Anzahl Pakete (Number of transmitted Packets: N_{Tx}) periodisch mit einem Sendezeitintervall (Transmission interval: t_{TI}) versendet und dass das Funksystem für jedes empfangene Paket für die Zeit des Sendezeitintervalls als fehlerfrei gilt, kann die Verfügbarkeit wie folgt bestimmt werden:

$$A = \frac{N_{Rx} t_{TI}}{N_{Tx} t_{TI}} = \frac{N_{Rx}}{N_{Tx}} \quad (4)$$

Für jeden beliebigen Betrachtungszeitraum t_{Oi} kann die Abhängigkeit der Verfügbarkeit a_i von gestörten Übertragungen (Number of lost Packets: N_{PL}) wie folgt dargestellt werden:

$$a_i(t_{Oi}) = \frac{\Delta N_{Rxi}}{\Delta N_{TXi}} = \frac{\Delta(N_{TXi} - N_{PLi})}{N_{TXi}} = 1 - \frac{\Delta N_{PLi}}{\Delta N_{TXi}} = 1 - \frac{\Delta N_{PLi} t_{TI}}{\Delta N_{TXi} t_{TI}} = 1 - \Delta N_{PLi} \frac{t_{TI}}{\Delta t_{oi}} \quad (5)$$

Die Darstellung in Formel (5) verdeutlicht, dass das Verhältnis zwischen Sendezeitintervall und Betrachtungszeitraum von Bedeutung ist. Je weiter sich der Betrachtungszeitraum dem Sendezeitintervall nähert, umso stärker wirken sich Paketverluste negative auf die Verfügbarkeit aus. Andererseits können bei einem langen Betrachtungszeitraum gehäufte Paketverluste und damit zeitlich begrenzte Einbrüche der Verfügbarkeit nicht erkannt werden.

- **Paketverlustrate:** Oft wird statt der Verfügbarkeit die Paketverlustrate (PLR) zur Bewertung eines Kommunikationssystems herangezogen. Mit Bezug auf Formel (4) und Formel (5) kann sie wie folgt ermittelt werden:

$$PLR = \frac{N_{PL}}{N_{TX}} = \frac{N_{TX} - N_{Rx}}{N_{TX}} = 1 - A \quad (6)$$

bzw.

$$plr_i(t_o) = \frac{\Delta N_{PL}}{\Delta N_{TX}} = 1 - a_i(t_o) \quad (7)$$

4.2.2 Testergebnisdarstellung

4.2.2.1 Allgemeines

Für eine einheitliche und eindeutige Charakterisierung von Funklösungen ist neben der Definition von Kenngrößen auch eine Festlegung aussagekräftiger Kennwerte erforderlich. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den hier aufgeführten Kenngrößen um Zufallsvariablen handelt, deren Werteverteilung mehr oder weniger von den in [9] aufgeführten Einflussgrößen bestimmt wird. Nachfolgend werden statistische Parameter spezifiziert, die zur Bewertung der Funklösungen herangezogen werden sollen.

4.2.2.2 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit wird nicht direkt gemessen, sondern wie in Formel (5) dargestellt, aus gemessenen Größen berechnet. Eine erste Aussage über die Verfügbarkeit gibt der über die gesamte Messdauer T_M ermittelte Wert A . Oft ist es aber erforderlich, Häufungen von Paketverlusten festzustellen, weil diese die Verfügbarkeit der übergeordneten Anwendung beeinträchtigen können. Deshalb wird festgelegt, dass Partialwerte a_i der Verfügbarkeit für alle Pakete p_{Rxi} mit folgenden Bedingungen ermittelt werden:

$$5 \leq i \leq N_{Tx} \quad (8)$$

$$\frac{t_{Ti}}{\Delta t_{Oi}} = \frac{1}{5} \quad (9)$$

Die Partialwerte a_i der Verfügbarkeit werden in einem Histogramm dargestellt. Der minimale Partialwert und der Gesamtwert der Verfügbarkeit für die Messdauer T_M wurden zur Laufzeit des Projektes zunächst nicht in die Tabelle Performance-Eigenschaften aufgenommen. Zukünftig soll diese Kenngröße jedoch Berücksichtigung finden.

4.2.2.3 Paketverlustrate

Alternativ zur Verfügbarkeit kann auch die Paketverlustrate angegeben werden. Für die Ermittlung der Partialwerte sollen die Festlegungen aus Abschnitt 4.2.2.2 entsprechend gelten. Der maximale Partialwert und der Gesamtwert der Paketverlustrate für die Messdauer T_M werden anstelle der Zuverlässigkeitswerte in die Tabelle Performance-Eigenschaften (siehe Tabelle 6) aufgenommen.

4.2.2.4 Echtzeitfähigkeit

Zur Beurteilung der Echtzeitfähigkeit werden sowohl die Werte der Übertragungszeit, der Aktualisierungszeit und der Anlaufzeit ermittelt. Die Werte werden in Histogrammen dargestellt, wie in Abbildung 14 für die Übertragungszeit und in Abbildung 15 für die Aktualisierungszeit exemplarisch gezeigt. Die Zeitwerte in den Darstellungen sind auf den Sendezeitabstand bezogen.

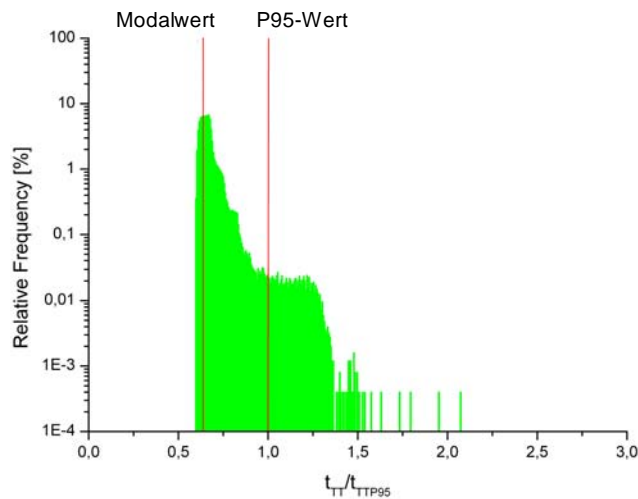


Abbildung 14: Darstellung der Übertragungszeit

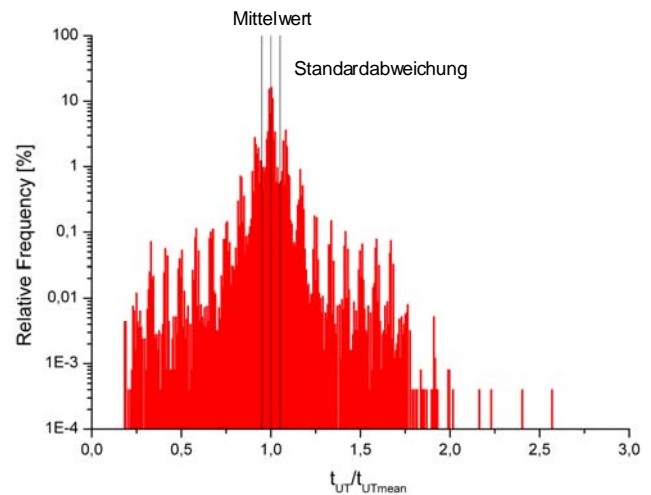


Abbildung 15: Darstellung der Aktualisierungszeit

Für die Übertragungszeit werden der Minimalwert, der Modalwert und der Perzentil P95-Wert in die Tabelle Performance-Eigenschaften (siehe Tabelle 6) aufgenommen. Der Minimalwert zeigt die untere Zeitgrenze für eine Übertragung vom Producer zum Consumer. Dieser Wert sagt aber noch nichts darüber aus, wie schnell nacheinander der Producer Nutzdaten versenden kann. Der Modalwert markiert die Zeit, die eine Übertragung am häufigsten benötigt hat. Er eignet sich gut als Maß für das Zentrum. Der Perzentil P95-Wert gibt die Zeit an, den 95% aller Werte nicht überschritten haben. Dieser Wert ist ein guter Kompromiss zwischen der Signifikanz eines Wertes für die Varianz und der Größe der Stichprobe.

Für die Aktualisierungszeit werden der Mittelwert und die Standardabweichung in die Tabelle Performance-Eigenschaften (siehe Tabelle 6) aufgenommen.

Die Anlaufzeit wurde aufgrund der fehlenden Umsetzung durch das Testsystem während der Projektlaufzeit zunächst nicht in die Tabelle Performance-Eigenschaften aufgenommen.

4.2.2.5 Zusammenfassung

Die statistischen Parameter der Übertragungszeit (siehe Abbildung 16) und der Aktualisierungszeit (siehe Abbildung 17) werden für alle relevanten Testfälle in je einer Grafik zusammengefasst. Damit wird ein erster optischer Eindruck über die Ergebnisse vermittelt.

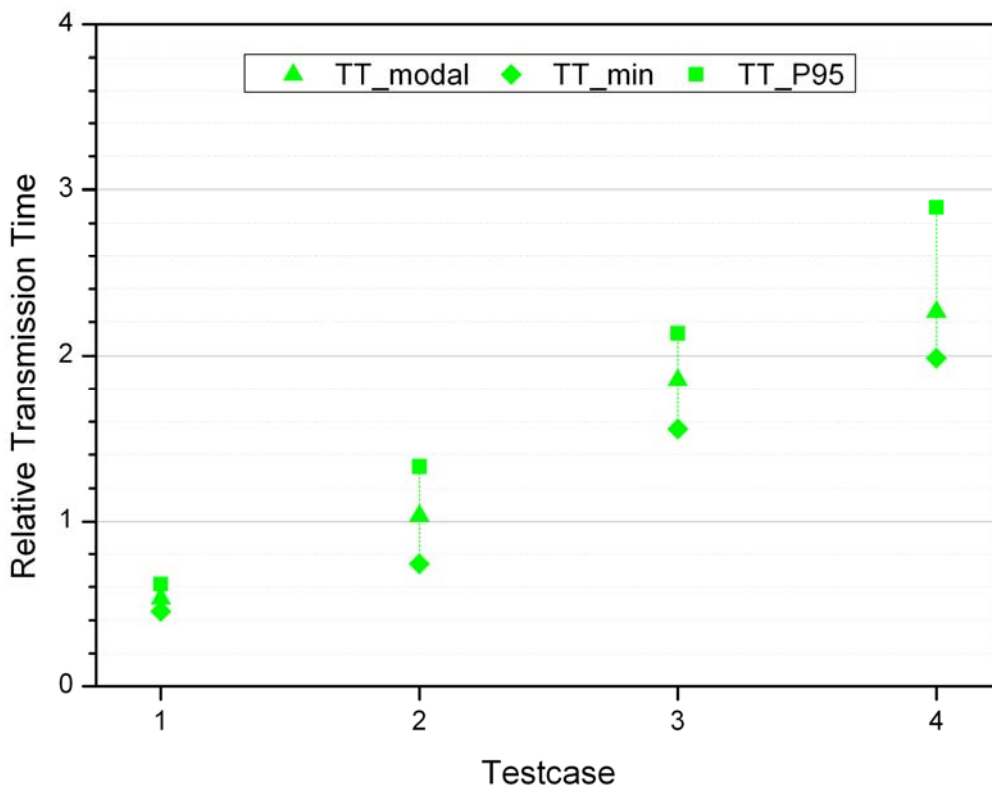


Abbildung 16: Zusammenfassung der Übertragungszeitwerte

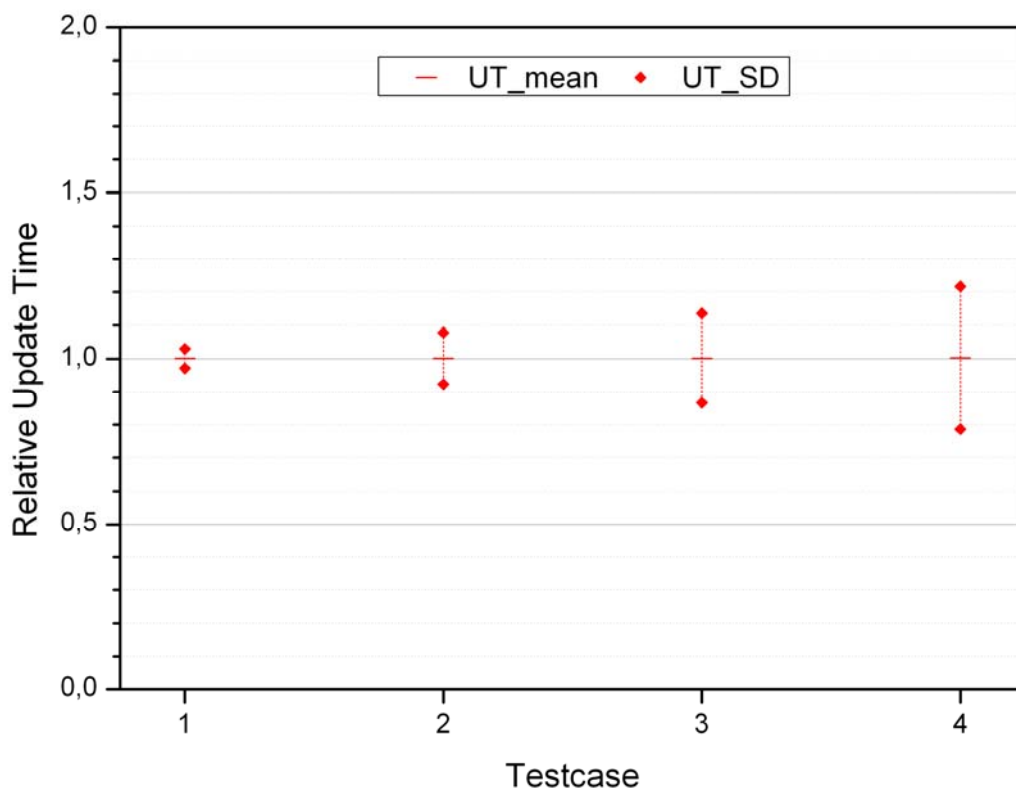


Abbildung 17: Zusammenfassung der Aktualisierungszeitwerte

Die Auflistung aller statistischen Parameter in einer Tabelle Performance-Eigenschaften macht einen genauen Vergleich möglich.

Tabelle 6: Performance-Eigenschaften

Test case	Packet Loss rate		Transmission time [ms]			Update time [ms]	
	Max	Total	Min.	Mode	P95	Mean	SD
TC xxx							

4.2.3 Testfallspezifikation

4.2.3.1 Allgemeines

Ausgehend von den Ausführungen in diesem Dokument und den Festlegungen in [9] und [10] werden Standardtestfälle zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen definiert. Bei der Ausarbeitung wurden die Festlegungen dem projektbegleitenden Ausschuss zur Diskussion gestellt und von diesem akzeptiert.

Für die Standardtestfälle lassen sich einige Einflussgrößen fest spezifizieren. Andere sind Bestandteil des Kanalmodells (siehe [14]) oder sind während der Tests zu dokumentieren. In den nachfolgenden Tabellen werden diese Einflussgrößen spezifiziert. Für die Einflussgrößen, die die Standardtestfälle definieren, werden Wertebereiche angegeben.

- **Anwendungsbezogene Einflussgrößen:** Die anwendungsbezogenen Parameter beziehen sich auf die Testanwendung, die die Stelle der automatisierungstechnischen Anwendung einnimmt. Da die Tests mithilfe eines Kanalemulators durchgeführt werden, spielt die Ausdehnung der Anwendung keine Rolle. Die Testanwendung stellt keine Anforderungen an die Security.

Tabelle 7: Anwendung

Short name	Standard Performance Test Applications
ID	STA
Number of communication devices	2
Number of logical links	1
Spatial dimension	irrelevant
Security objectives	irrelevant

Die Position der Kommunikationsgeräte ist irrelevant, da die Tests in einem Laboraufbau vorgenommen werden. Auch werden sich die Testanwendungen nicht bewegen.

Tabelle 8: Kommunikationsgerät 1

ID	TP
Position of communication device	irrelevant
Motion of communication device	irrelevant
Role	Producer

Tabelle 9: Kommunikationsgerät 2

ID	TC
Position of communication device	irrelevant
Motion of communication device	irrelevant
Role	Consumer

Die Entfernung der Testanwendungen spielt wiederum keine Rolle.

Tabelle 10: Logische Verbindung

ID	TL
Endpoints	
Producer	TP
User data length [octet]	2, 20, 64
Initiation of data transfer	periodisch
Transmission interval [ms]	50, 100, 250, 4000
Consumer	TC
Distance between communication devices [m]	irrelevant
Safety requirement	keine

- **Geräte- und Systembezogene Einflussgrößen:** Es wird jeweils nur ein zu testendes System untersucht. Daneben kann ein anderes Funksystem als Störer auftreten, das allerdings nicht getestet wird.

Tabelle 11: Funksysteme

Number of wireless systems	1
----------------------------	---

Es wird davon ausgegangen, dass Hersteller in der Regel ein komplettes System testen. Es wird aber auch vorgesehen, dass nur ein Gerät getestet werden soll. In dem Fall muss das Testsystem ein Referenzgerät als Kommunikationspartner zur Verfügung stellen. Wenn die Funklösung eine Infrastrukturkomponente benötigt, sind zwei physikalische Verbindungen zu berücksichtigen.

Tabelle 12: Funksystem

ID	zu dokumentieren
Wireless technology or standard	zu dokumentieren
Topology	Punkt-zu-Punkt
Number of wireless devices	1, 2 (zu dokumentieren)
Number of infrastructure components	0, 1 (zu dokumentieren)
Number of physical links	1, 2 (zu dokumentieren)
Modulation	optional zu dokumentieren
Bit rate of the physical link	optional zu dokumentieren
Media access control mechanism	optional zu dokumentieren
Adaptivity mechanism	optional zu dokumentieren
Security mechanisms	zu dokumentieren

Nicht in jedem Fall liegen alle hier aufgeführten Informationen vor. Je mehr Angaben gemacht werden, umso einfacher ist die Bewertung der Testergebnisse. Das liegt in erster Linie im Interesse des Herstellers. Die Angaben zur Antenne sind nur relevant, wenn sie beim Test genutzt werden.

Tabelle 13: Funkgerät 1 und 2

ID	zu dokumentieren
Network type	zu dokumentieren
Position	irrelevant
Antenna system	
Antenna type	zu dokumentieren
Antenna gain	zu dokumentieren
Antenna radiation pattern	zu dokumentieren
Polarisation	zu dokumentieren
Antenna adjustment	zu dokumentieren
Antenna cable	zu dokumentieren
Transmit Power	zu dokumentieren
Effective isotropic radiated power (e.i.r.p.)	zu dokumentieren
Total radiated power (TRP)	zu dokumentieren
Transmit spectrum mask	optional zu dokumentieren
Power spectral density	optional zu dokumentieren
Maximum number of retransmissions	optional zu dokumentieren
Receiver sensitivity	optional zu dokumentieren
Receiver maximum input level	optional zu dokumentieren
Dynamic range	optional zu dokumentieren
Selectivity	optional zu dokumentieren
Change of link	zu dokumentieren
Communication cycle	optional zu dokumentieren
Communication interface	
Type of communication interface	zu dokumentieren
Bit rate of Communication interface	zu dokumentieren

Wenn eine Infrastrukturkomponente beim Test berücksichtigt wird, sind folgende Angaben erforderlich. Die Position ist im Prinzip irrelevant, die Entfernung zwischen den Funkkomponenten ist jedoch auf zwei physikalische Verbindungen aufzuteilen.

Tabelle 14: Infrastrukturkomponente

ID	zu dokumentieren
Type of infrastructure component	zu dokumentieren
Position of infrastructure component	irrelevant

Wenn eine Infrastrukturkomponente beim Test berücksichtigt wird, ist für jede physikalische Verbindung die halbe Entfernung zwischen den Funkgeräten anzunehmen. Die Entfernungen, die Bewegung und die Sichtverbindung zwischen den Funkgeräten entsprechen den zu entwickelnden Kanalmodellen und werden für die Testreihen festgelegt.

Tabelle 15: Physikalische Verbindung 1

ID	PL1
Wireless components	
End point 1	
Duty cycle	optional zu dokumentieren
Tx-sequence	optional zu dokumentieren
Tx-gap	optional zu dokumentieren
End point 2	
Duty cycle	optional zu dokumentieren
Tx-sequence	optional zu dokumentieren
Tx-gap	optional zu dokumentieren
Distance between wireless components [m]	10, 25, 100, 700
Relative movement betw. wireless components [m/s]	0; 1,5; 2,5; 5
Intervisibility	LOS, NLOS, OLOS
Number of used frequency channels	optional zu dokumentieren
Dwell time	optional zu dokumentieren

Tabelle 16: Genutzte Frequenzkanäle

Channel identification	optional zu dokumentieren
Centre frequency	optional zu dokumentieren
Bandwidth	optional zu dokumentieren

- **Umgebungsbezogene Einflussgrößen:** Die Umgebungsbedingungen entsprechen den für die Anwendungsprofile zu entwickelnden Kanalmodellen.

Tabelle 17: Anwendungsbereich

Characteristic of the area of operation	Indoor, Outdoor
Dimension of the area of operation	gemäß Anwendungsprofil
Natural environmental conditions	irrelevant

Tabelle 18: Störer

Number of relevant positions	0, 1
Number of other frequency users	0
Number of other wireless systems	0, 1

Es werden zwei Ansätze untersucht. Im ersten Fall erfolgt die Störung mit einem Vector Signal Generator. Da das Signal nicht durch das zu testende Signal gestört werden kann, ist eine konkrete Aussage über den Einfluss möglich. Im zweiten Fall wird eine Kommunikation zwischen zwei WLAN-Geräten als Störung eingespeist. Das entspricht eher der Realität. Allerdings wird das Störsystem selbst je nach zu testendem System mehr oder weniger stark gestört, was die Störung des zu testenden Systems verringern kann.

Tabelle 19: Anderes Funksystem

ID	VSG, WLAN
Type of wireless system	IEEE 802.11g
Media utilisation	
Number of used frequency channels	1
Dwell time	irrelevant
Centre frequency	zu dokumentieren
Bandwidth	20 MHz
Transmit spectrum mask	zu dokumentieren
Duty cycle	zu dokumentieren
Tx-sequence	zu dokumentieren
Tx-gap	zu dokumentieren

Tabelle 20: Position der Störer

ID	PVSG, PWLAN
Frequency users	kein
Wireless systems	VSG, WLAN
Signal to interference ratio	zu dokumentieren

4.2.3.2 Testreihe „Maschine“

Für die Testreihe „Maschine“ werden folgende Einflussgrößenwerte spezifiziert.

Tabelle 21: Spezifikation Testreihe „Maschine“

Producer	TP
User data length [octet]	2
Transmission interval [ms]	100
Distance between wireless components [m]	10
Relative movement betw. wireless components [m/s]	0; 5
Intervisibility	NLOS
Characteristic of the area of operation	Indoor
Number of other wireless systems	0, 1

Unter Berücksichtigung der Bewegung und der Störung durch ein WLAN-System ergeben sich folgende Testfallspezifikationen.

Tabelle 22: Testfallspezifikation „Maschine“

Testfall	1.1	1.2	1.3
Relative movement betw. wireless components [m/s]	0	0	5
Number of other wireless systems	0	1	0

4 Standardisierte Testfälle zur Untersuchung des Zeit- und Fehlerverhaltens

Für jeden Testfall wird eine Stichprobe von 1 000 000 spezifiziert. Das ergibt eine Testdauer von ca. 28 Stunden je Testfall.

4.2.3.3 Testreihe „Fertigungshalle“

Für die Testreihe "Fertigungshalle" werden folgende Einflussgrößenwerte spezifiziert.

Tabelle 23: Spezifikation Testreihe „Fertigungshalle“

Producer	TP
User data length [octet]	64
Transmission interval [ms]	250
Distance between wireless components [m]	100
Relative movement betw. wireless components [m/s]	0; 1,5
Intervisibility	NLOS
Characteristic of the area of operation	Indoor
Number of other wireless systems	0, 1

Unter Berücksichtigung der Bewegung und der Störung durch ein WLAN-System ergeben sich folgende Testfallspezifikationen.

Tabelle 24: Testfallspezifikation „Fertigungshalle“

Testfall	2.1	2.2	2.3
Relative movement betw. wireless components [m/s]	0	0	1,5
Number of other wireless systems	0	1	0

Für jeden Testfall wird eine Stichprobe von 1 000 000 spezifiziert. Das ergibt eine Testdauer von ca. 70 Stunden je Testfall.

4.2.3.4 Testreihe „Prozessautomation“

Für die Testreihe „Prozessautomation“ werden folgende Einflussgrößenwerte spezifiziert.

Tabelle 25: Spezifikation Testreihe „Prozessautomation“

Producer	TP
User data length [octet]	20
Transmission interval [ms]	4000
Distance between wireless components [m]	100, 700
Relative movement betw. wireless components [m/s]	0
Intervisibility	NLOS, OLOS
Characteristic of the area of operation	Indoor, Outdoor
Number of other wireless systems	0, 1

Unter Berücksichtigung der Sichtbarkeit der Funkgeräte, der Charakteristik der Umgebung und der Störung durch ein WLAN-System ergeben sich folgende Testfallspezifikationen.

Tabelle 26: Testfallspezifikation „Prozessautomation“

Testfall	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
Distance between wireless components [m]	100	100	700	700	700
Intervisibility	NLOS	NLOS	NLOS	OLOS	NLOS
Characteristic of the area of operation	Indoor	Indoor	Outdoor	Outdoor	Outdoor
Number of other wireless systems	0	1	0	0	1

Für jeden Testfall wird eine Stichprobe von 50 000 spezifiziert. Das ergibt eine Testdauer von ca. 56 Stunden je Testfall.

4.2.3.5 Testreihe „Spezialanwendung“

Für die Testreihe „Spezialanwendung“ werden folgende Einflussgrößenwerte spezifiziert.

Tabelle 27: Spezifikation Testreihe „Spezialanwendung“

Producer	TP
User data length [octet]	2
Transmission interval [ms]	50
Distance between wireless components	25
Relative movement betw. wireless components [m/s]	2,5
Intervisibility	OLOS
Characteristic of the area of operation	Indoor
Number of other wireless systems	0, 1

Da lediglich die Störung durch ein WLAN-System berücksichtigt werden soll, ergeben sich folgende Testfallspezifikationen.

Tabelle 28: Testfallspezifikation „Spezialanwendung“

Testfall	4.1	4.2
Number of other wireless systems	0	1

Für jeden Testfall wird eine Stichprobe von 1 000 000 spezifiziert. Das ergibt eine Testdauer von ca. 14 Stunden je Testfall.

5 Modellierung industrieller Funkkanäle

5.1 Übersicht

Die vorbereitende Arbeit für die Modellierung industrieller Funkkanäle war die Analyse der relevanten HF-Übertragungsbedingungen. Grundlage für die Auswahl der Messumgebungen waren die im Vorfeld in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss festgelegten Anwendungsklassen. Vor jeder Messung wurde die jeweilige Umgebung mittels der festgelegten Einflussgrößen beschrieben. Anschließend wurden HF-Messungen durchgeführt.

Die geeignete Modellierung industrieller Funkkanäle war ein zentraler Ansatz dieses Forschungsvorhabens, da sich die angestrebten Standardtests nur sehr schwer in realen Umgebungen verwirklichen lassen. Messungen in realen Umgebungen sind sehr aufwändig und dadurch kostspielig, nicht reproduzierbar und wegen eines laufenden Produktionsprozesses ist der Zugang zu dieser Umgebung oft nicht möglich. Das Hauptargument für eine Emulation ist die Reproduzierbarkeit. Damit wird eine Vergleichbarkeit von Tests von Funklösungen unterschiedlicher Standards und Hersteller ermöglicht.

Im Folgenden werden die Eigenschaften industrieller Funkgeräte sowie die Kenngrößen zur deren Beschreibung ausgeführt. Anschließend werden die verwendeten Messverfahren, eine Übersicht der durchgeführten Messungen und die Ergebnisse einiger Beispielmessungen beschrieben. Abschließend wird das Verfahren der Emulation und dessen Validierung gezeigt.

5.2 Vermessung industrieller Funkkanäle

5.2.1 Eigenschaften industrieller Funkkanäle

Ein Funkkanal ohne Beeinträchtigung der Wellenausbreitung durch Hindernisse wird als idealer Funkkanal bezeichnet. Der Gewinn des Funkkanals, welcher das Verhältnis von Empfangsleistung P_E zu Sendeleistung P_S bezeichnet, ist hier nur von der Entfernung l , der Frequenz f sowie von dem Gewinn der Sende- und Empfangsantenne (G_{SA} , G_{EA}) abhängig. Der Gewinn des Funkkanals ist das Betragsquadrat des Übertragungsfaktors. Deren dB-Werte sind identisch. Abbildung 18 zeigt eine Skizze dieses idealen Funkkanals.

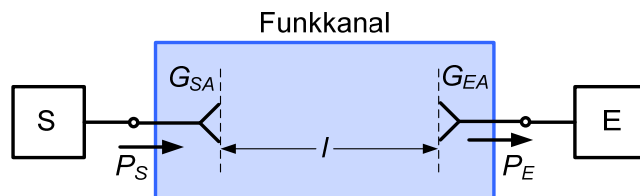


Abbildung 18: Skizze des idealen Funkkanals

Diese idealen Ausbreitungseigenschaften liegen für viele reale Umgebungen aber nicht vor. Gerade in geschlossenen Räumen werden elektromagnetische Wellen an Hindernissen reflektiert und gebeugt, oder allgemein gestreut. Diese Bedingungen gelten besonders für industrielle Umgebungen. Stärker noch als beispielsweise in häusliche Umgebungen werden hier wegen der vielen metallischen und daher stark streuenden Oberflächen starke „Echos“ erzeugt. Diese führen zu einem ausgeprägten frequenzabhängigen Übertragungsfaktor.

Bewegen sich Sender und Empfänger relativ zu einander oder bewegen sich Hindernisse im Bereich der Funkausleuchtung, so führt dies zu einem zeitveränderlichen Funkkanal. Dadurch ist der Funkkanal zeitvariant und der Übertragungsfaktor wird zeitabhängig.

Eine Darstellung dieser Effekte ist in Abbildung 19 zu sehen. Dabei hat der Empfänger in einem Fall Sichtverbindung (LOS) und in einem zweiten Fall keine Sichtverbindung (NLOS).

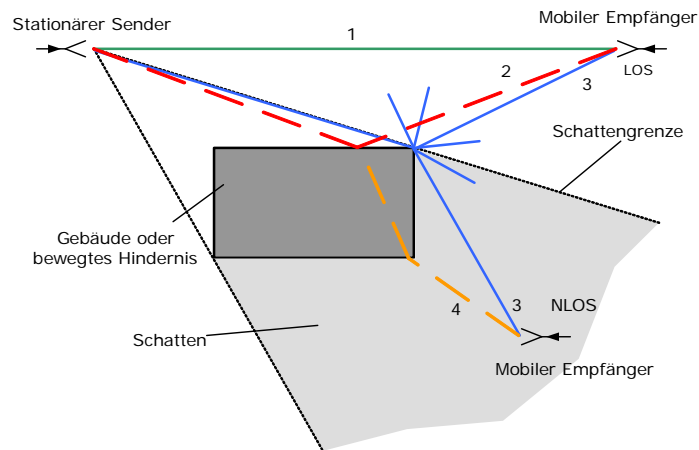


Abbildung 19: Effekte im realen Funkkanal: (1) direkte Welle, (2) reflektierte Welle, (3) gebogene Welle, (4) gebrochene Welle

5.2.2 Kenngrößen und statistische Parameter zur Charakterisierung industrieller Funkkanäle

5.2.2.1 Kenngrößen und statistische Parameter frequenzvarianter Funkkanäle

Für die Charakterisierung der Mehrwegeausbreitung in industriellen Umgebungen wird der frequenzabhängige Übertragungsfaktor verwendet. Die wichtigsten statistischen Parameter in der Darstellung im Frequenzbereich sind H_{Median} und ΔH_{1090} . H_{Median} sind im Gegensatz zum Mittelwert robust gegenüber Ausreißern und ΔH_{1090} bezeichnet den Bereich, in dem ausgehend vom Median 80% aller Werte liegen. Abbildung 20 zeigt das Beispiel einer zeitvarianten Übertragungsfunktion mit den dazugehörigen statistischen Parametern.

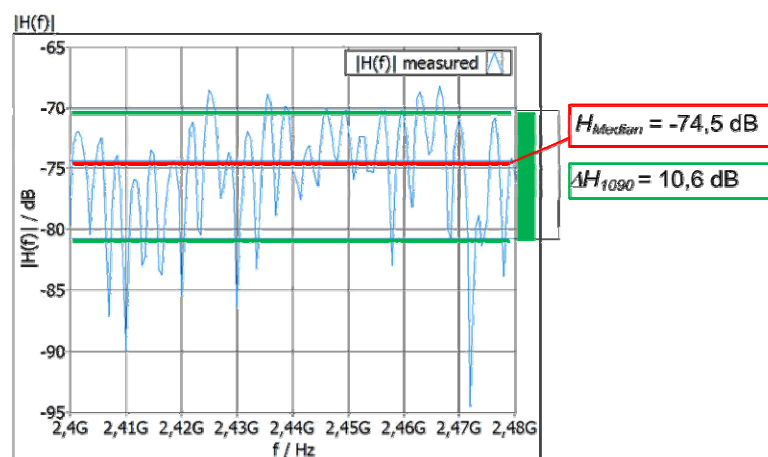


Abbildung 20: Frequenzabhängiger Übertragungsfaktor mit den statistischen Parametern H_{Median} und ΔH_{1090}

5.2.2.2 Kenngrößen und statistische Parameter zeitvarianter Funkkanäle

Für die Charakterisierung zeitvarianter Funkkanäle gibt es, ähnlich wie bei dem Verlauf der frequenzvarianten Übertragungsfunktion, den zeitabhängiger Übertragungsfaktor. Dieser Verlauf beschreibt die zeitliche Änderung eines Funkkanals für eine feste Frequenz. Auch hier existieren die Parameter H_{Median} und ΔH_{1090} . ΔH_{1090} ist hier ein Maß für die Stärke der zeitselektiven Schwankungen.

5.2.2.3 Kenngrößen und statistische Parameter zeit- und frequenzvarianter Funkkanäle

Für viele Funkkanäle reicht eine reine zeit- oder frequenzvariante Beschreibung des Übertragungsverhaltens nicht aus. In diesem Fall muss der Funkkanal gleichzeitig zeit- und frequenzvariant beschrieben werden.

5.2.2.4 Störemissionen

Zusätzlich zu dem Funkkanal wurden für jede Umgebung die Störemissionen erfasst. Hierfür wurde das Funkspektrum mit einem echtzeitfähigen Spektrumanalysator zeit- und frequenzvariant gemessen. Somit konnten reale Störquellen untersucht werden, die anschließend bei dem Entwurf der Standardtestfälle und der Emulation berücksichtigt werden. Abbildung 21 zeigt ein gemessenes Spektrum einer industriellen Umgebung. Hier war zusätzliches zu einem Schmalband-System bei 2,451 GHz zusätzlich ein Bluetooth-System aktiv, was sich an den Frequenzsprüngen zeigt.

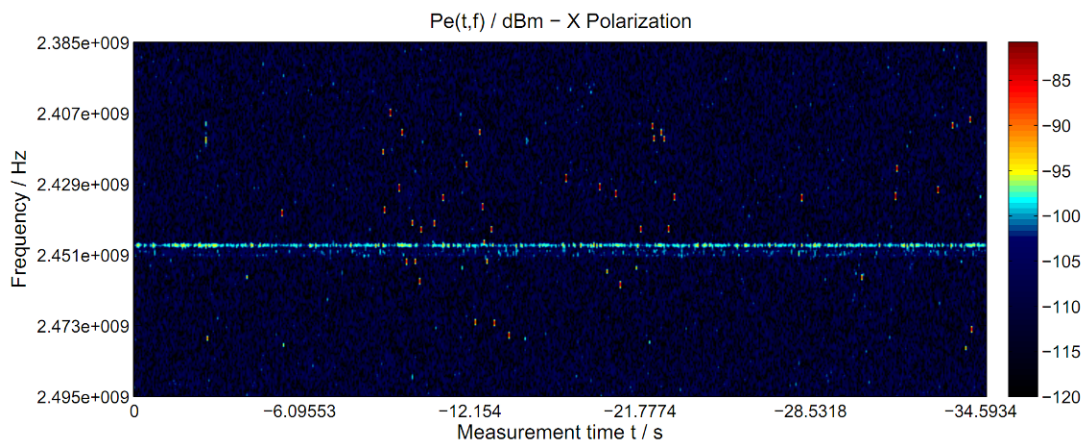


Abbildung 21: Zeit- und frequenzvariantes Emissionsspektrum $P_e(t,f)$ im 2,4-GHz-ISM-Band

5.2.3 Verwendete Messverfahren

5.2.3.1 Messverfahren mit Netzwerkanalysator

Bei der Messung mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator (NWA) wird ein Sinussignal der Frequenz f über eine Antenne abgestrahlt und gleichzeitig intern als Referenz weitergeleitet. Eine zweite Antenne empfängt das von der ersten Antenne abgestrahlte Signal. Der Übertragungsfaktor ist der Quotient des an der zweiten Antenne empfangenen Signals und des Referenzsignals. Diese Messung wird anschließend für weitere Frequenzen wiederholt. Somit erhält man die frequenzabhängige Übertragungsfunktion des Funkkanals.

Nachteilig bei mobilen Funkstationen ist eine notwendige Kabelverbindung zwischen den beiden Antennen des Funkkanals bei der NWA-Messung.

5.2.3.2 Messverfahren mit Spektrumanalysator

Bei diesem Verfahren wird ein Sinussignal der Frequenz f abgestrahlt und von einem Spektrumanalysator (SA) im Zero-Span-Modus als frequenzselektives Oszilloskop gemessen. Man erhält einen zeitabhängigen Übertragungsfaktor bei der Frequenz f .

Als Erweiterung werden ein modulierbarer Signalgenerator und ein Echtzeit-Spektrumanalysator (RSA) verwendet. Die Aufgabe des Signalgenerators ist es, ein breitbandiges Signal (Δf) mit einem definierten Pegel zu liefern. Dies kann zum Beispiel durch On-Off-Keying eines sinusförmigen Signals erreicht werden, das über eine Antenne abgestrahlt wird. Mit dem Echtzeit-Spektrumanalysator wird das Empfangssignal breitbandig über eine definierte Zeitdauer gemessen. Damit kann der Übertragungsfaktor frequenz- und zeitselektiv bestimmt werden (Abbildung 22).

Im Gegensatz zur NWA-Messung ist keine Kabelverbindung zwischen Sender und Empfänger notwendig.

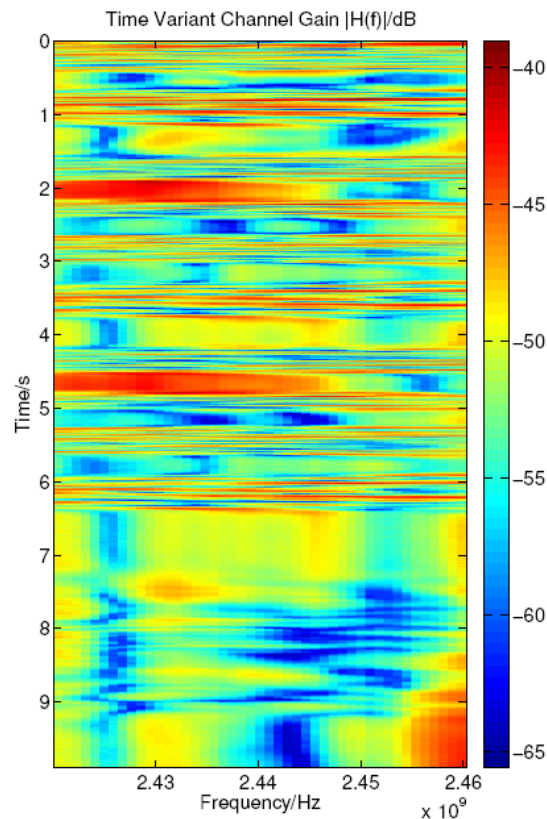


Abbildung 22: Beispiel eines zeit- und frequenzselektiven Übertragungsfaktors. Der Funksender wurde an einem Roboterarm platziert.

5.2.3.3 Vermessung zeit- und frequenzvarianter Funkkanäle

Frequenzvariante, zeitkonstante Funkkanäle

Ist eine industrielle Umgebung zeitlich konstant, ist die rein frequenzvariante Beschreibung des Übertragungsverhaltens des Funkkanals ausreichend. Diese Messung wird zweckmäßig mit dem NWA durchgeführt.

Frequenzvariante Funkkanäle mit geringer Zeitabhängigkeit

Derartige Funkkanäle liegen vor, wenn lediglich Personenbewegungen auftreten. Hierfür eignet sich ebenfalls die Messung mit dem NWA. Durch eine geeignete Systemeinstellung kann die Messzeit für die frequenzabhängige Übertragungsfunktion auf ca. 100 ms begrenzt werden. Durch einen automatisierten Betrieb des NWA können bis zu 10 Übertragungsfunktionen pro Sekunde gemessen werden. Die Anzahl der Messungen pro Sekunde ist abhängig von der verwendeten Auflösungsbandbreite und der Anzahl der Messpunkte.

Frequenzflache, zeitvariante Funkkanäle

Diese Funkkanäle liegen vor, wenn schmalbandige Funksysteme betrachtet werden und die Umgebung sich zeitlich sehr schnell ändert. Zweckmäßig wird mit einer Sinusquelle und einem Spektrumanalysator (SA) im Zero-Span-Modus gemessen.

Frequenz- und zeitvariante Funkkanäle

In vielen industriellen Umgebungen liegen schnelle Bewegungseffekte vor, die z.B. durch Fahrzeuge oder Roboterbewegungen hervorgerufen werden. Der Einsatz eines breitbandigen Funksystems erfordert die frequenz- und zeitvariante Charakterisierung des Funkkanals. Hierfür sind ein modulierbarer Signalgenerator und der RSA erforderlich.

5.2.4 Durchführung der Messungen

5.2.4.1 Übersicht

Für die Analyse der Funkübertragungsbedingungen in den verschiedenen Umgebungsklassen der festgelegten Standardtestfälle wurden umfangreiche Messreihen durchgeführt. Dabei wurden in einem ersten Schritt zunächst HF-Messungen durchgeführt. Tabelle 29 listet die hierfür durchgeführten Messreihen auf. Diese Messungen bildeten außerdem die Grundlage für die Validierung der HF-Messungen.

Tabelle 29: Übersicht der HF-Messungen

Testreihe	Umgebungsklasse	Beschreibung	Parameter
1	Fertigungshalle	Sich füllende Industriehalle Phoenix Contact	Frequenzvarianter Übertragungsfaktor, Emissionen
2	Maschine	Maschinenumgebung Phoenix Contact	Zeit- und frequenzvarianter Übertragungsfaktor, Emissionen
3	Fertigungshalle	Industriehalle Phoenix Contact	Frequenzvarianter Übertragungsfaktor, Emissionen
4	Prozessautomation	Galileo Testfeld Magdeburg	Zeitvarianter Übertragungsfaktor, Zeit- und frequenzvarianter Übertragungsfaktor
5	Prozessautomation	Indoor Prozessanlage BASF	Frequenzvarianter Übertragungsfaktor
6	Prozessautomation	Außengelände Chempark Dormagen	Frequenzvarianter Übertragungsfaktor, Emissionen

5.2.4.2 Ergebnisse der HF-Messung: Langzeitmessung – sich füllende Industriehalle – Phoenix Contact

Das Besondere an dieser Testreihe stellt die allmählich gefüllte Industriehalle dar. Hier kann der Unterschied zwischen einer leeren Industriehalle und einer Industriehalle mit den typischen Hindernissen (z.B. Maschinen, Lagerplätze) messtechnisch erfasst werden. Die Antennen wurden mittels Plexiglaswinkeln an der Kabeltrasse unter der Decke befestigt. Die frequenzabhängige Übertragungsfunktion wurde mit Hilfe eines Netzwerkanalysators gemessen. Die Positionen der Antennen und die Entfernungen zwischen den Antennen sind in Abbildung 23 zu sehen. Insgesamt wurde jeweils der Funkkanal zwischen den Messpunkten 1 und 2, 2 und 3 sowie 1 und 3 vermessen.



Abbildung 23: Karte der Umgebung: PxC Langzeitmessung

Die Messung wurde an 3 verschiedenen Terminen im Abstand von mehreren Wochen durchgeführt. Bei der ersten Messung war die Maschinenhalle noch fast leer, bei der letzten Mes-

sung fertig gefüllt. Abbildung 24 gibt einen Einblick in den jeweiligen Aufbauzustand der Industriehalle, wobei die Positionen der Antennen 2 und 3 in den Fotos gelb markiert wurden.



Abbildung 24: Langzeitmessung Fertigungshalle: 04.03.2010 (links) 11.03.2010 (mitte) und 31.03.2010 (rechts)

Das Ziel der Messungen war es, den Einfluss von Hindernissen in einer Industrieumgebung auf die frequenzvariante Übertragungsfunktion des Funkkanals zu messen. Zusätzlich wurde bei jeder Messung das Emissionsspektrum gemessen. Um die gleichbleibende Position der Sendeantennen zu gewährleisten und einen zeitintensiven Auf- und Abbau zu vermeiden, wurden die Antennen und die Kabel für die gesamte Testdauer fest montiert.

Die Übertragungsfunktionen des Funkkanals zwischen den Positionen 1 und 3 an den 3 verschiedenen Messterminen sind in Abbildung 25 dargestellt.

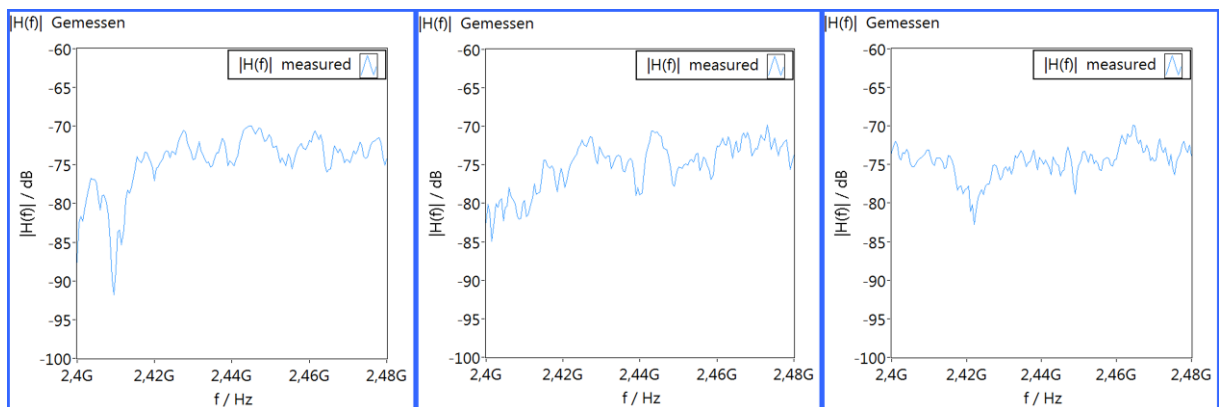


Abbildung 25: Frequenzvariante Übertragungsfunktionen – Pos. 1-3 - Langzeitmessung Fertigungshalle: 04.03.2010 (links) 11.03.2010 (mitte) und 31.03.2010 (rechts)

Bei der leeren Halle kommt es zu wenigen starken Frequenzeinbrüchen. Dies liegt an den wenigen großflächigen Objekten, die Funkwellen streuen, wie beispielsweise Wände, Boden und Decke. Mit zunehmender Bebauung kommt es zu einer höheren Anzahl an Frequenzeinbrüchen, deren Stärke aber abnimmt. Durch die vielen streuenden metallischen Objekte im Funkkanal überlagern sich Signalanteile am Empfänger konstruktiv und destruktiv und verursachen so eine Art Mittelung des frequenzvarianten Übertragungsfaktors.

Aus den Übertragungsfunktionen wurden die dazugehörigen statistischen Parameter berechnet. Tabelle 30 zeigt die statistischen Parameter für den Funkkanal zwischen Position 1 und 3 an den 3 unterschiedlichen Messterminen. Zusätzlich zu den in Kapitel 5.2.2 vorgestellten statistischen Parametern werden hier noch weitere angegeben. τ_{first} , τ_{max} , τ_{med} und τ_{rms} sind statistische Parameter der Impulsantwort. Die Impulsantwort kann aus der komplexen Übertragungsfunktion berechnet werden und gibt durch die dargestellten Parameter Aufschluss über das Mehrwegeverhalten des Funkkanals. Ein weiterer statistischer Parameter ist die Kohärenzbandbreite B_c . Dieser Parameter bezeichnet die Frequenzdifferenz Δf , um die sich zwei Sinussignale im Mittel unterscheiden müssen, um bei der Übertragung völlig unterschiedliche Übertragungseigenschaften vorzufinden. Bei all diesen Parametern gibt es nur kleine Änderungen, die darauf hindeuten, dass sich der Funkkanal durch die zusätzliche Bebauung der Fertigungshalle kaum ändert.

Tabelle 30: Statistische Parameter der Übertragungsfunktionen – Pos. 1-3 – Langzeitmessung Fertigungshalle

Testfall	H_{Median}	ΔH_{1090}	τ_{first}	τ_{max}	τ_{med}	τ_{rms}	B_c	Datum, Messpunkte
1.1.3	-73,8 dB	8,4 dB	298 ns	298 ns	320 ns	67 ns	34,4 MHz	04.03.2010, Pos. 1- 3
1.2.3	-74,3 dB	8,5 dB	298 ns	298 ns	318 ns	65 ns	33,5 MHz	11.03.2010, Pos. 1- 3
1.3.3	-74,4 dB	5,3 dB	298 ns	298 ns	313 ns	55 ns	35,5 MHz	31.03.2010, Pos. 1- 3

Die statistischen Parameter zeigen, dass der gemittelte Kanalgewinn bei Bebauung nur um 0,6 dB sinkt. Diese kaum merkliche Verschlechterung spielt in der Praxis keine Rolle. Gleichzeitig verkleinert sich die Spanne ΔH_{1090} , was die Annahme belegt, dass die Stärke der spektralen Einbrüche abnimmt.

5.3 Emulation industrieller Funkkanäle

5.3.1 Das Prinzip des Emulators

Für die Emulation realer Funkkanäle werden für Labortests zweckmäßig Funkkanalemulatoren eingesetzt. Ein häufig angewendetes Realisierungsprinzip von Kanalemulatoren ist die Verwendung von diskreten Signalprozessoren (DSPs) oder programmierbaren Logikschaltungen (FPGAs). Leider ist dies jedoch nicht im GHz-Bereich möglich. Vielmehr muss das Eingangssignal zunächst in einen niederfrequenten Bereich heruntergemischt und anschließend digitalisiert werden. In dieser niederfrequenten digitalen Ebene wird die eigentliche Emulation des Funkkanals ausgeführt. Anschließend wird wiederum zunächst ein analoges Signal erzeugt und in den ursprünglichen Frequenzbereich hochgemischt. Dieses Verfahren hat mehrere Einschränkungen:

- Es kann nur ein begrenzter Frequenzbereich umgesetzt werden. Typisch sind 20 oder 40 MHz in einem festgelegten Frequenzbereich.
- Das Prinzip funktioniert nur in einer Übertragungsrichtung. Zur Erreichung der physikalisch erforderlichen Übertragungssymmetrie sind die Signalverarbeitungsketten für Hin- und Rückrichtung getrennt auszuführen. Der reale Signalweg muss also künstlich in zwei getrennte Richtungen aufgeteilt werden.
- Ein reales Funksignal durchläuft einen derartigen Emulator niemals in derselben Form wie den realen Funkkanal, weil es durch elektronische Maßnahmen verändert wird. Damit ergeben sich systembedingt Nachteile bezüglich der Echtzeitfähigkeit und eines begrenzten Datendurchsatzes.

Aus diesen Gründen wird hier ein anderer Ansatz ohne Frequenzumsetzung und AD-Konversion verfolgt. Es findet eine direkte breitbandige Emulation im realen Frequenzbereich statt. Abbildung 26 zeigt das Prinzip.

Der Aufbau des Emulators erfolgt mit Signalteilern (gelbe Markierung), programmierbaren Dämpfungsgliedern (grüne Markierung) und Laufzeitverzögerungs-Leitungen (rote Markierung).

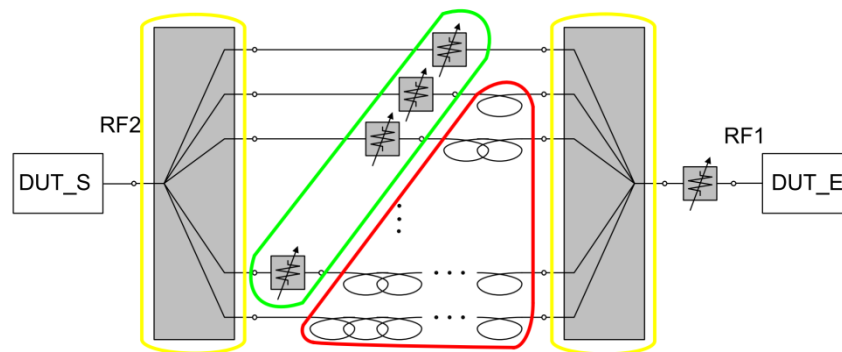


Abbildung 26: Schematischer Aufbau des Emulators

Durch die begrenzte Anzahl von acht internen Ausbreitungspfaden kann zwar keine exakte Nachbildung beliebiger frequenzselektiver Übertragungsfunktionen erreicht werden, doch es hat sich gezeigt, dass reale industrielle Funkkanäle ausreichend genau nachgebildet werden können. Um auch zeitlich schnell veränderliche Kanäle nachbilden zu können, wird der Emulator von einem echtzeitfähigen Industrie-PC gesteuert. Die zeitliche Auflösung liegt bei 1 ms. Dies bedeutet, dass pro Sekunde 1000 verschiedene frequenzabhängige Übertragungsfunktionen emuliert werden können. Dies hat sich für industrielle Funkkanäle als ausreichend herausgestellt.

5.3.2 Validierung auf der HF-Ebene

Im Folgenden wird eine Auswahl an Verfahren vorgestellt, die es ermöglichen, aus den gewonnenen Messergebnissen Kanalmodelle zu erstellen. Diese Kanalmodelle sind speziell auf den beschriebenen echtzeitfähigen Kanalemulator zugeschnitten, können aber grundsätzlich auch für andere Funkkanalemulatoren verwendet werden.

5.3.2.1 Modellierung des frequenzselektiven Übertragungsfaktors mittels der „Kleinst-Quadrat-Methode“

Bei diesem Verfahren wird der komplexe emulierte Übertragungsfaktor des Kanalemulators als gewichtete Kombination der komplexen Übertragungsfaktoren der Einzelpfade dargestellt. Diese komplexen Übertragungsfaktoren der Einzelpfade können als komplexe Vektoren interpretiert werden; dies sind die Basisvektoren. Jedes Element in einem solchen Vektor repräsentiert den Übertragungsfaktor bei einer definierten Frequenz. Auch der vermessene Funkkanal wird als Vektor dargestellt. Eine bestmögliche Annäherung entspricht nun einer optimalen Gewichtung der Vektoren der einzelnen Pfade, sodass deren Summe einen möglichst kleinen Abstand zu dem Vektor des gemessenen Funkkanals aufweist. Werden alle Gewichtungen der Basisvektoren bis auf eine als konstant angenommen, so ist der quadrierte Abstand eine quadratische Funktion der variierenden Gewichtung. Nach Ermittlung von drei quadrierten Abständen kann die Gewichtung durch die Scheitelpunktform einer quadratischen Gleichung berechnet werden, die den kleinsten Abstand aufweist. Durch dieses Prinzip kann die optimale Gewichtung jedes Basisvektors ermittelt werden. Eine ideale Gewichtung mit Nullabstand kann meistens nicht gefunden werden, da die Anzahl der Basisvektoren deutlich kleiner als die Dimension des Vektorraums ist. Das Ergebnis einer solchen Annäherung ist in Abbildung 27 dargestellt. Je kleiner der Frequenzbereich gewählt wird, desto besser ist die Emulation.

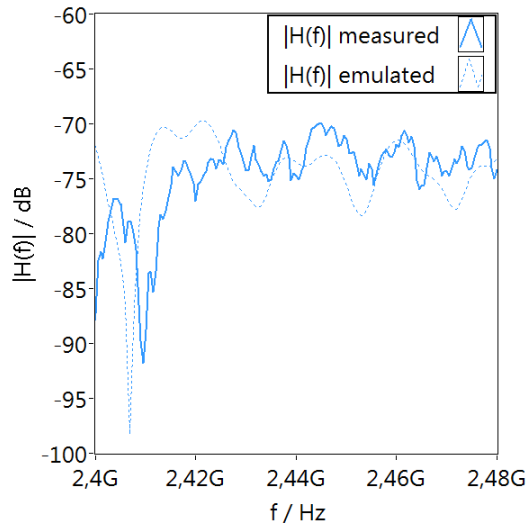


Abbildung 27: Vergleich Messung und Emulation von $H(f)$ - „Kleinste-Quadrate-Methode“

Weitere Methoden für die Emulation industrieller Funkkanäle werden als „statistische Approximation“ und als „variables Dämpfungsglied“ bezeichnet.

Die statistische Approximation hat das Ziel, die statistischen Parameter der realen frequenzabhängigen Übertragungsfunktion möglichst genau zu emulieren. Die Zielparameter sind hier der Median H_{Median} der Übertragungsfunktion und die Parameter H_{10} und H_{90} , welche eine Aussage über die Varianz der Funktion machen.

Bei der dritten Emulationsmethode wird der Funkkanalemulator als ein variables Dämpfungsglied betrieben. Dabei wird der erste Signalpfad auf den Wert des Medians der „realen“ Übertragungsfunktion eingestellt und die übrigen Signalpfade maximal gedämpft. Die resultierende Übertragungsfunktion ist frequenzflach.

5.3.2.2 Modellierung des zeitselektiven Übertragungsfaktors

Für die Erstellung der Parameter eines zeitselektiven, frequenzflachen Kanals werden in dem in Abbildung 26 dargestellten Aufbau alle Pfade, mit Ausnahme des ersten, maximal gedämpft. Daraus ergibt sich eine Impulsantwort ohne Echos, was im Frequenzbereich gleichbedeutend mit einer frequenzflachen Übertragungsfunktion ist. Für die Emulation wird das erste einstellbare Dämpfungsglied auf den Wert des Betrags des gemessenen Übertragungsfaktors eingestellt. Der Wert wird mit dem zeitlichen Abstand Δt der Messpunkte variiert, wobei Δt nicht kleiner als 1 ms werden darf. Wie in Abbildung 28 zu sehen ist, kann eine gute Übereinstimmung von Realität und Emulation erreicht werden.

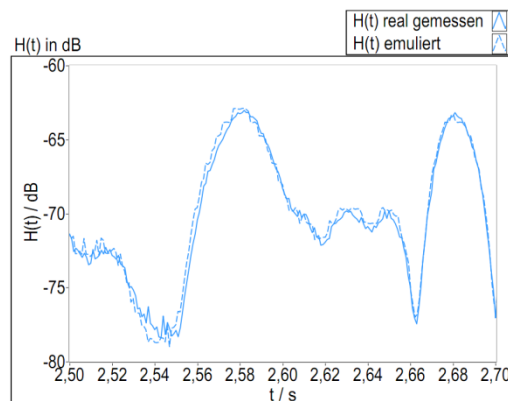


Abbildung 28: Vergleich Messung und Emulation von $H(t)$

5.3.2.3 Modellierung des zeit- und frequenzselektiven Übertragungsfaktors

Für die Erzeugung der Parameter des Emulators werden hier die Methoden aus 5.3.2.1 zyklisch ausgeführt. Für alle gemessenen frequenzselektiven Übertragungsfunktionen werden zu verschiedenen Zeitpunkten die jeweiligen emulierten Verläufe erzeugt. Auch hier gilt die Einschränkung auf 1 ms als kleinster Zeitunterschied. Abbildung 29 zeigt ein Beispiel eines solchen Kanals, der in einer bewegten industriellen Umgebung vermessen wurde. Hier sind sowohl die mehrwegebedingten Schwundeinbrüche, als auch die zeitabhängigen Schwankungen zu sehen.

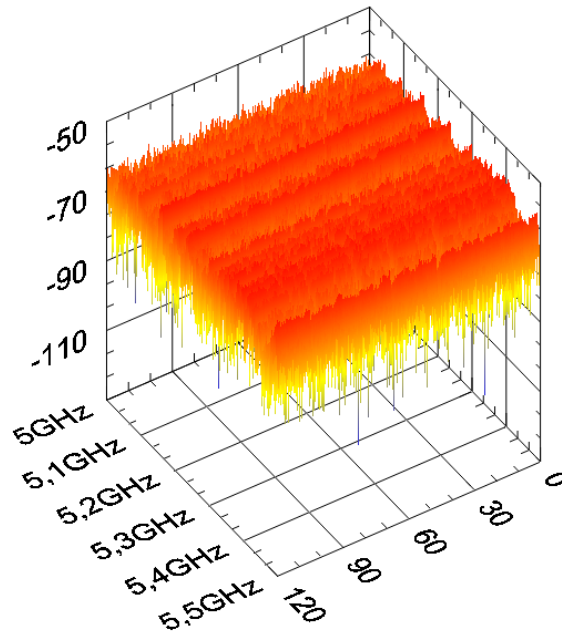


Abbildung 29: Beispiel eines frequenz- und zeitselektiven Funkkanals

6 Testsystem für Standardtests

6.1 Übersicht

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Durchführung von Standardtests erläutert. Außerdem wird das Konzept eines Testsystems beschrieben, mit dem diese Standardtests durchgeführt werden können. Dieses Konzept orientiert sich an den Herstellern industrieller Funklösungen oder an entsprechenden Dienstleistern, die zum Teil nicht über umfangreiches HF-Know-how verfügen. Darüber hinaus wird auch eine Version des Testsystems für Experten spezifiziert. Dieses System wird zum einen in diesem Vorhaben zur Validierung der Testmethodik eingesetzt, zum anderen kann es zur tieferen Analyse neuer Funktechnologien und -standards herangezogen werden.

Die Spezifikation von Testmethodik und Testsystem ist ausgehend von einem Modell des Betrachtungsraumes, wie es in Kapitel 3.1 vorgestellt wurde, entwickelt worden. Mittels der in Kapitel 4.1.4 vorgestellten standardisierten Einflussgrößen und der in Kapitel 4.1.5 festgelegten dazugehörigen Einflussgrößenwerte für das jeweilige Anwendungsprofil wurde eine industrielle Automatisierungsanwendung abgebildet.

Das Kapitel ist so gegliedert, dass zunächst die Anforderungen an das Testsystem anhand eines ausgewählten Anwendungsprofils vorgestellt werden. Anschließend wird die Funktionsstruktur des Standardtestsystems, das aus der Abstraktion des Betrachtungsraums abgeleitet wurde, präsentiert. Dabei wird auch der Aufbau eines exemplarischen Testsystems beschrieben. Auf die Komponenten dieses Testsystems wird anschließend kurz eingegangen.

6.2 Anforderungen an das Testsystem

In Folgenden werden ausgewählte Anforderungen an das Testsystem vorgestellt. Die Anforderungen gliedern sich in 3 Kategorien, nämlich den Anforderungen der Anwendung, der Umgebung und der Funksysteme. Eine ausführliche Beschreibung der Anforderungen befindet sich in Dokument [11].

6.2.1 Anforderungen der Anwendung (Anwendungsprofil „Maschine“)

Die exemplarisch aufgeführten Anforderungen an die Anwendung sind in Tabelle 31 aufgelistet.

Tabelle 31: Anforderungen der Anwendung für das Anforderungsprofil „Maschine“

Einflussgröße	Wertebereich	Bemerkung
Anzahl Kommunikationsgeräte	16	In der Regel werden nur ein oder zwei Geräte einer Funklösung dem Test unterzogen, wobei jedem Funkgerät ein Kommunikationsgerät zugeordnet ist. Die Kommunikationslast weiterer Kommunikationsgeräte verursacht eine zusätzliche Medienbelegung, die das Zeitverhalten der zu testenden Funklösung beeinflussen kann.
Räumliche Ausdehnung des Kommunikationsnetzwerkes (L x B x H)	10 m x 5 m x 5 m	Wird durch Kanalmodell berücksichtigt.
Bewegung der Kommunikationsgeräte	0 m/s, 5 m/s	Wird durch Kanalmodell berücksichtigt.
Nutzdatenlänge	2 Octet	Wird durch Anwendungsmodell berücksichtigt.

6.2.2 Anforderungen der Umgebung (Anwendungsprofil „Maschine“)

Die exemplarisch aufgeführten Anforderungen an die Anwendung sind in Tabelle 32 aufgelistet.

Tabelle 32: Anforderungen der Umgebung für das Anforderungsprofil „Maschine“

Einflussgröße	Wertebereich	Bemerkung
Charakterisierung des Einsatzbereiches	Indoor	Wird durch Kanalmodell berücksichtigt.
Anzahl anderer Frequenznutzer	Siehe 0	Andere Frequenznutzer sind durch das Anwendungsmodell zu berücksichtigen.
Typ anderer Funkssysteme	WLAN IEEE 802.11g	Die Kommunikation in einem WLAN-System ist durch das Anwendungsmodell zu berücksichtigen.

6.2.3 Anforderungen der zu testenden Systeme (Anwendungsprofil „Maschine“)

Die Kommunikationsanforderungen des Anwendungsprofils „Maschine“ werden durch Funk-systeme erfüllt, die auf IEEE 802.15.1 basieren, wie z. B. Bluetooth oder WISA. Dabei werden die Daten von den Sensoren an eine Basisstation gesendet. Die Basisstation stellt die Verbindung zur Steuerung und den Aktoren her. Die direkte Kommunikation zwischen Sensoren und Aktoren ist in der Regel nicht vorgesehen. Soll das Verhalten der Übertragung von Sensoren zu Aktoren untersucht werden, ist für den Test eine Infrastrukturkomponente als Basisstation vorzusehen. Die Anforderungen der Funk-systeme für das Anforderungsprofil „Maschine“ sind in Tabelle 33 aufgelistet.

Tabelle 33: Anforderungen der Funk-systeme für das Anforderungsprofil „Maschine“

Einflussgröße	Wertebereich	Bemerkung
Funktechnologie oder Standard	unbegrenzt	Das Konzept soll keine Einschränkungen bezüglich der Funktechnologie vorsehen.
Topologie	Punkt-zu-Punkt, Stern	Im Testsystemkonzept wird eine Sterntopologie berücksichtigt.
Anzahl Infrastrukturkomponenten	0, 1	Im Testsystemkonzept ist das Vorhandensein einer Infrastrukturkomponente vorgesehen.
Antenne	intern, extern, Antennen-Diversity	Die drahtlosen Sensoren oder EA-Geräte besitzen oft interne Antennen. WISA nutzt Antennendiversität und empfängt auf mehreren Kanälen gleichzeitig.

6.2.4 Spezifisches Testsystemkonzept

In Tabelle 34 wird beschrieben, wie die spezifischen Anforderungen des Anwendungsprofils „Maschine“ mithilfe des Anwendungsmodells umgesetzt werden. Dabei werden auch hier nicht alle Einflussgrößen behandelt, sondern nur die in Tabelle 31 bis Tabelle 33 unter Anforderungen aufgelisteten Größen.

Tabelle 34: Umgesetzte Anforderungen beim Anwendungsmodell „Maschine“

Einflussgröße	Bemerkung
Anzahl Kommunikationsgeräte	Abbildung 30 zeigt das Konzept zur Berücksichtigung zusätzlicher Kommunikationsgeräte, welche die Medienbelastung erhöhen. Dies wird mit einem Vektor-Signalgenerator emuliert.
Nutzdatenlänge	Wird mit dem Multiface erzeugt
Anzahl anderer Frequenznutzer	Wird mit einem Vektor-Signalgenerator (VSG) erzeugt
Typ anderer Frequenznutzer	Wird mit einem VSG erzeugt

Typ anderer Funkssysteme	Es wird ein Referenz-WLAN-System vorgesehen. Die Initiierung des Datenverkehrs erfolgt durch einen Data-Quality-Analyzer.
Topologie	Die Arbeiten in diesem Vorhaben konzentrieren sich auf eine Punkt-zu-Punkt-Topologie. Im Testsystemkonzept wird aber auch eine Sterntopologie berücksichtigt, wie in Abbildung 31 dargestellt.
Anzahl Infrastrukturkomponenten	Wie in Abbildung 31 dargestellt, kann eine reale Basisstation als Referenzgerät berücksichtigt werden. Sie könnte allerdings auch mit dem VSG emuliert werden.
Räumliche Ausdehnung des Kommunikationsnetzwerkes (L x B x H)	Gegebenenfalls ist eine Infrastrukturkomponente als Basisstation vorzusehen, um die Ausdehnung des Funksystems abzudecken.
Bewegung der Kommunikationsgeräte	Wird durch den Kanalemulator abgebildet
Charakterisierung des Einsatzbereiches	Wird durch den Kanalemulator abgebildet
Funktechnologie oder Standard	Das Konzept sieht zunächst keine Einschränkungen bezüglich der Funktechnologie vor. Allerdings konzentrieren sich die Arbeiten in diesem Vorhaben auf Funklösungen, die das 2,4-GHz-Frequenzband nutzen. Beispielhaft werden Systeme betrachtet, die auf IEEE 802.15.1 basieren, wie Bluetooth und WISA.
Antenne	Die drahtlosen Sensoren oder EA-Geräte besitzen oft interne Antennen. Hierfür sind in den abgeschirmten Messboxen Koppelantennen vorzusehen.

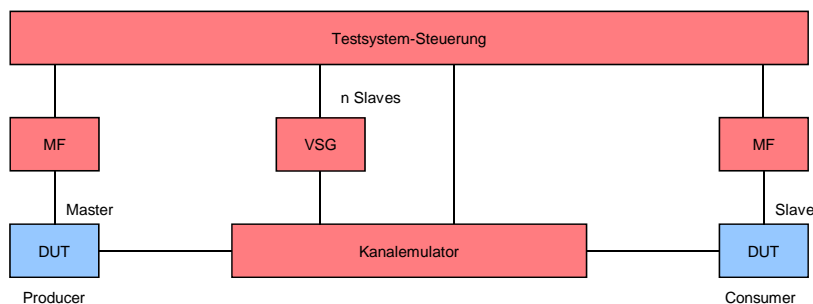


Abbildung 30: Testkonzept für die Berücksichtigung der Anzahl Kommunikationsgeräte

Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen verschiedene Testfälle. In Abbildung 30 wird die Kommunikation zwischen Master und Slave abgebildet. In Abbildung 31 erfolgt die Kommunikation zweier Slaves über einen Master. Eine Auswahl weiterer Funknetztopologien ist in 6.6.1 aufgeführt.

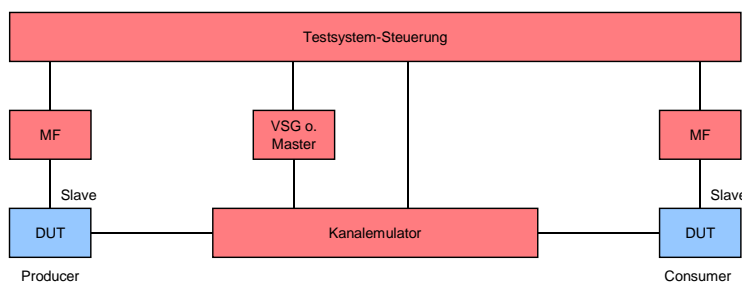


Abbildung 31: Testkonzept für die Berücksichtigung einer Basisstation

6.3 Aufbau des Testsystems und der Testprojektverwaltung

6.4 Funktionsstruktur

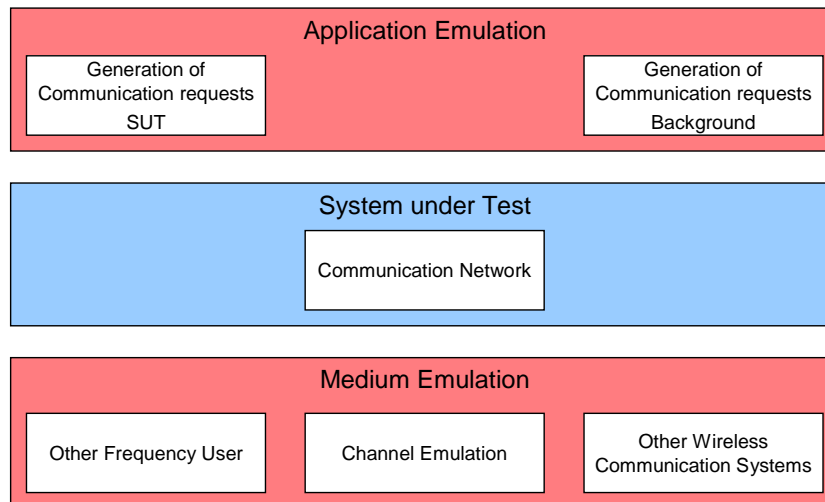


Abbildung 32: Funktionelle Teststruktur

Die Hauptbestandteile der funktionellen Teststruktur sind das zu testende System (System under Test – SUT) und das ausführende Testsystem.

Das ausführende Testsystem ist in Abbildung 32 rot und das SUT blau dargestellt. Das Testsystem beinhaltet zwei Funktionen, die Emulation der Testanwendung und die Emulation des Mediums. Das SUT beinhaltet die zu testenden Geräte (Device under Test – DUT), die ein Kommunikationsnetzwerk bilden. Bei einem Test werden vorzugsweise zwei DUTs eingesetzt, es können aber auch mehrere sein. Je nach zu ermittelnder Kenngröße können die DUT den Endpunkten in einem Producer-Consumer-Model oder Client-Server-Model zugeordnet werden. Die Testanwendung generiert Testdaten (Nutzdaten), die an das DUT zur Übertragung übergeben werden und generiert zusätzliche Daten für die Hintergrundanwendung.

6.5 Hardwarestruktur

Gemäß der in 6.4 beschriebenen funktionellen Testsystemstruktur ergibt sich für die Standardtests die in Abbildung 33 dargestellte Geräteteststruktur.

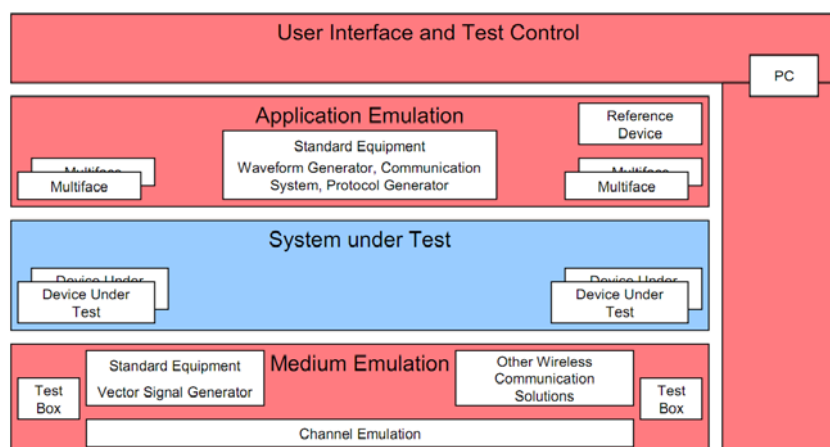


Abbildung 33: Geräte-Testsystemstruktur für Standardtests

Die Testanwendung zur Generierung der Testpakete und zur Ermittlung der Kenngrößen wird in Abhängigkeit der Anwender-Schnittstelle mit Hilfe der Multifaces oder eines Data-Quality-Analysers realisiert.

Der Datenabgleich zwischen Testanwendung und Testprojektverwaltung erfolgt beim Data-Quality-Analyser offline und beim Multiface online. Die Datenübergabe zwischen Testanwendung und Testauswertung wird mittels Dateiaustausch vorgenommen.

6.6 Hardwareaufbau

Es ist ein exemplarischer Aufbau des Testsystems entstanden, welcher die in 6.4 beschriebene Funktionsstruktur und den in 6.2.3 vorgestellten Hardwareaufbau umsetzt. Abbildung 34 zeigt den Hardwareaufbau des Demonstrators. Die DUT werden dabei in abgeschirmten Testboxen untergebracht und die Funksignale werden drahtgebunden in den Kanalemulator eingekoppelt. Die Testanwendung wird mit der drahtgebundenen Schnittstelle der Funkgeräte verbunden. Zusätzlich können, je nach Testfallspezifikation, ein Signalgenerator oder ein Spektrumanalysator zum Monitoring in den Testaufbau eingebunden werden. Die Steuerung aller Komponenten und des Testablaufs wird von einem zentralen Rechner aus durchgeführt, auf dem eine Testprojektverwaltungssoftware installiert ist. Die Verbindung der Komponenten mit der Testprojektverwaltung erfolgt über Ethernet-Leitungen.

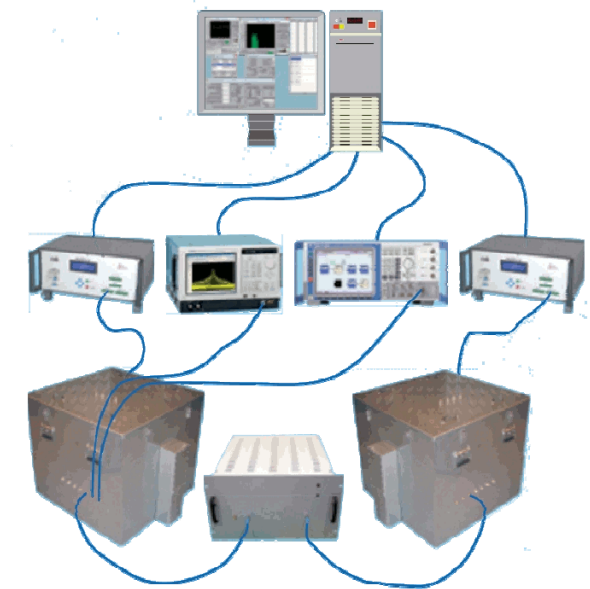


Abbildung 34: Exemplarischer Aufbau des Testsystems

6.6.1 Emulationsverfahren für unterschiedliche Funknetztopologien

Die folgenden Funknetztopologien zeigen eine Auswahl an Testszenarien, die mit dem echtzeitfähigen Kanalemulator möglich sind. Weitere Testszenarien finden sich im Dokument [15].

6.6.2 Standardtestszenario

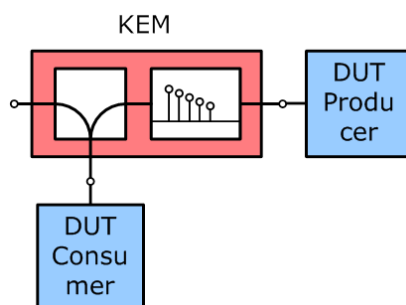


Abbildung 35: Testszenario 1 – DUTs ohne Störer

Abbildung 35 zeigt den Standardtestfall für die Emulation eines Funkkanals. Beide DUTs sind mittels Koaxialleitungen über den Kanalemulator verbunden.

6.6.3 DUTs mit Störer

Abbildung 36 zeigt das Standardtestszenario mit einem zusätzlichen Störer am dritten Anschluss des Kanalemulators. Der Störer kann ein Signalgenerator oder ein fremder Funk-sender sein. Mit einer Variation der Sendeleistung und der Medienbelegung im Zeit- und Frequenzbereich können unterschiedliche Störszenarien emuliert werden. Hierbei wird in erster Linie der DUT-Consumer gestört, da das Signal des Störers für den Producer durch den emulierten Funkkanal gedämpft wird.

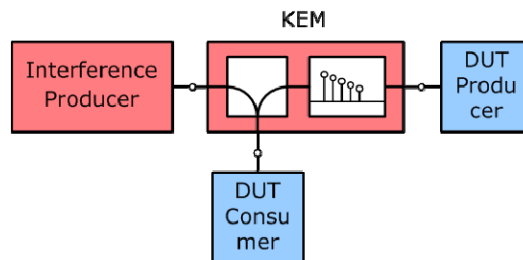


Abbildung 36: Testszenario 2 – DUTs mit Störer (Vektor-Signalgenerator)

6.6.4 DUTs mit Zirkulator und Störer

Im Blockschaltbild der Abbildung 37 wird statt des Störers ein reales Störsystem eingesetzt. Die Anbindung an den Emulator erfolgt über einen Zirkulator. Damit wird verhindert, dass das Störsystem von den DUTs beeinflusst wird. Über eine Änderung der Sendeleistung des Störsystems oder durch den Einsatz weiterer Dämpfungsglieder können unterschiedliche Entfernungen zwischen den DUTs und dem Störsystem emuliert werden.

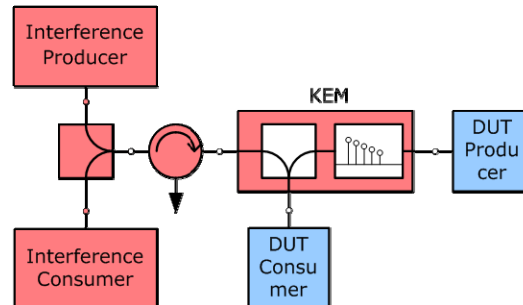


Abbildung 37: Testszenario 3 – DUTs mit Zirkulator und Störer (Reales Funksystem)

6.6.5 Kommunikation über Infrastrukturkomponente

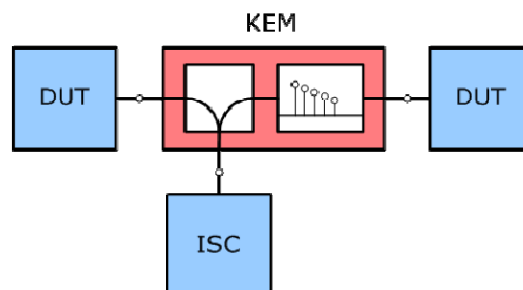


Abbildung 38: Testszenario 4 – Kommunikation über eine Infrastrukturkomponente

Testszenario 4 in Abbildung 38 zeigt die Emulation eines Systems von zwei Clients, die über eine Infrastrukturkomponente kommunizieren. Hier wird der Übertragungsfaktor zwischen der Infrastrukturkomponente und einem Client mit dem Kanalemulator emuliert, der andere

Kanal kann mit Hilfe von Dämpfungsgliedern nachgebildet werden. Um mehrere Clients zu emulieren, kann mit einer erhöhten Datenlast an den DUTs gearbeitet werden.

6.7 Spezifikation der Komponenten des Testsystem

Im Folgenden werden die Komponenten des Demonstratoraufbaus aus [11] beschrieben.

6.7.1 Kanalemulator

Aufbau und Funktion des Funkkanalemulators sind detailliert in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Der Emulator ermöglicht es, die in 6.6.1 vorgestellten Netzwerktopologien zu unterstützen.

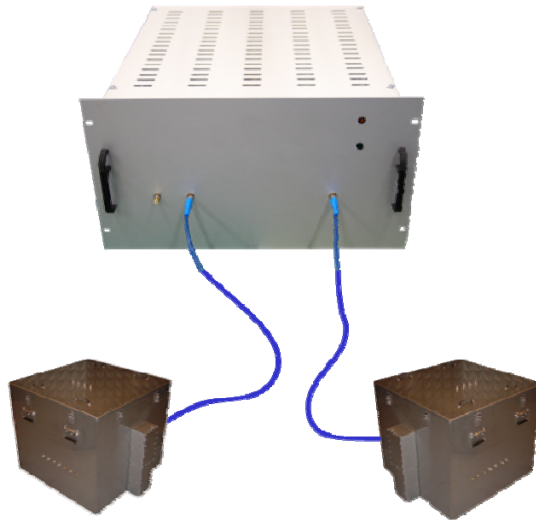


Abbildung 39: Echtzeitfähiger Kanalemulator mit Testboxen

Die zu testenden Funkmodule werden während der Messung jeweils in abgeschirmten Testboxen untergebracht (Abbildung 39). Dies ist notwendig, um eine ungewollte Kommunikation der Geräte untereinander durch eine parasitäre Gehäuseleckstrahlung auszuschließen. Außerdem werden dadurch störende Einflüsse von außen vermieden. Die Testboxen verfügen über eine Schirmdämpfung von ca. 60 dB.

DUTs mit externen Antennen werden bei abgeschraubter Antenne über eine Koaxialleitung an die Testbox angeschlossen. Bei DUTs mit integrierten Antennen wird das Funksignal drahtlos über breitbandige Koppelantennen innerhalb der Testbox ausgekoppelt. Dafür ist eine innere reflexionsarme Auskleidung der Testbox erforderlich.

6.7.2 Störsysteme

Die Emulation von Funksystemen und anderen Störquellen (z. B. Mikrowellenöfen) kann sehr gut von Vektor-Signal-Generatoren durchgeführt werden. Mit diesen Geräten kann sowohl ein vorher gemessenes HF-Spektrum reproduziert oder aber ein Störsystem eines gewünschten Standards nachgebildet werden. Hierbei können die zeitliche Medienbelegung, das Frequenzverhalten und die Sendeleistung entsprechend des Testfalls eingestellt werden. Vorteile eines Signalgenerators sind dabei ein deterministisches und reproduzierbares Störsignal, eine einfache Einbindung in das Testsystem und die Erweiterbarkeit für künftige Standards.



Abbildung 40: Beispiele für Störsysteme

Eine weitere Möglichkeit für die Einbringung von Störern auf die DUTs sind reale Funkkomponenten. Die Vorteile eines solchen Vorgehens sind ein realistischer Medienzugriff (z.B. LBT) und geringe Anschaffungskosten.

6.7.3 Testanwendung/Messung der Kenngrößen auf Applikationsebene

Damit das Zeit- und Fehlverhalten von Funklösungen aus Sicht der Applikation bewertet werden kann, ist Messtechnik erforderlich, die zum einen das Applikationsprofil emuliert und zum anderen eine Messung der Kenngrößen auf Applikationsebene ermöglicht. Die hierfür erforderlichen Messgeräte werden mit der Kommunikationsschnittstelle des DUT verbunden, die auch von der realen Applikation für die Übergabe der Daten genutzt wird. Dabei kann es sich sowohl um eine Software- oder Speicherschnittstelle aber auch um ein serielles oder paralleles Interface handeln.

DUT, die mit Schnittstellen wie z. B. RS232, RS485, SPI, I²C und Digital IO ausgestattet sind, können mit dem vom ifak e.V. Magdeburg entwickelten Multiface (Multifunctional Interface) in das Testsystem integriert werden, siehe Abbildung 41.



Abbildung 41: Frontansicht Multiface

Das Multiface wird über ein Testkontrollsystem (zentraler Steuerrechner – PC) konfiguriert und gesteuert. Die Verbindung zwischen diesen Komponenten erfolgt über eine TCP/IP-Verbindung. Der Konfigurationsprozess umfasst sowohl die Parametrisierung der Kommunikationsschnittstelle als auch die Festlegung der Eigenschaften der Testapplikation.

Industrielle Funklösungen bieten häufig auch Ethernet als Kommunikationsschnittstelle. Die Testanwendung wird in diesem Fall mit Hilfe eines Data Quality Analyser (DQA) Anritsu 1230B realisiert.



Abbildung 42: Data Quality Analyser Anritsu 1230B

Mit dem DQA ist es möglich, Ethernetpakete mit definierter Größe und definiertem Inhalt zu generieren und diese in definierten Zeitabständen (Sendezeitabstand) zu senden.

Mit dem DQA werden die Werte der in Tabelle 35 aufgeführten Kenngrößen ermittelt.

Tabelle 35: Kenngrößenermittlung mit DQA

Kenngrößen	Messgrößen des DQA
Übertragungszeit	Latency
Aktualisierungszeit	Relative Time
Paketverlustrate	Transmitted Frames
	Received Frames

Neben dem Multiface und dem Data Quality Analyser ist beim Test des Zeit- und Fehlerverhaltens von Funklösungen oft weitere Ausrüstung erforderlich. Dazu zählen z. B.

- Funktionsgeneratoren,
- Protokollgeneratoren,
- andere Funksysteme.

Der Einsatz der Testausrüstung wird im Testablauf berücksichtigt. Die Steuerung erfolgt durch das Testwerkzeug, die Testanwendung bzw. manuell.

6.7.3.1 Kommunikationssystem

Das Kommunikationssystem kann neben den zu testenden Geräten weitere Funkkommunikationskomponenten beinhalten. Diese Komponenten kommunizieren untereinander oder mit den zu testenden Geräten. Damit wird das von den DUT zur Übertragung genutzte Medium belegt, so dass es nur zum Teil genutzt werden kann. Es werden somit definierte Lastsituationen simuliert. Die Konfiguration der Funkkommunikationskomponenten (auch als Hintergrundanwendung bezeichnet) wird durch die Definition der Testumgebung festgelegt.

6.7.3.2 Funktionsgenerator

Um automatisiert Messungen mit unterschiedlichen Sendezeitabständen durchführen zu können, wird der Funktionsgenerator TGA12101 (TTi) genutzt. Der Funktionsgenerator steuert digitale Eingänge der Multifaces an. Mit der Impulsfrequenz wird der Sendezeitabstand festgelegt.

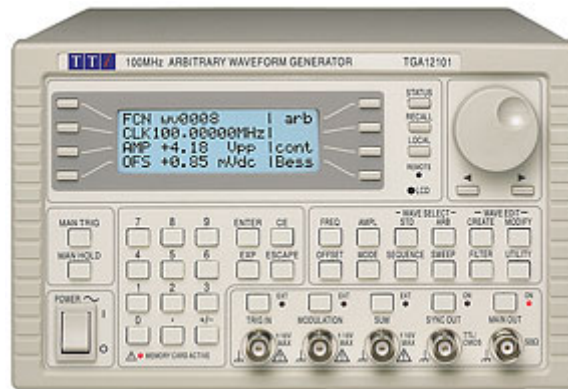


Abbildung 43: Funktionsgenerator TTI TGA12101

6.7.4 Testprojektverwaltung

Die Abbildung 44 zeigt eine Skizze der Testprojektverwaltung des exemplarischen Testsystems. Diese Testprojektverwaltung ist eine interaktive PC-Software für die Steuerung des Testsystems. Über eine grafische Benutzeroberfläche lassen sich die Testkomponenten entsprechend der spezifizierten Testfälle konfigurieren. Zusätzlich werden auch die Testergebnisse protokolliert und eine Testdokumentation wird generiert.

Die Software ist so aufgebaut, dass in einem Programmordner die Beschreibung der Standardtestfälle, die Konfigurationsdateien für den Kanalemulator und den Vektorsignalgenerator und eine Vorlage für das Ergebnisformular im Vorfeld hinterlegt sind.

Bevor die Tests starten, muss der Benutzer die Gerätebeschreibung der zu testenden DUTs hinterlegen. Hierzu gehören z.B. Angaben wie Schnittstellenbeschreibung (Ethernet, RS232, RS285, etc.) und die Spezifikation der Schnittstelle (Symbolrate, Data Bits, Parity, etc.).

Vor der Testausführung müssen vom Nutzer außerdem Projektinformationen eingegeben und eine Testfallauswahl getroffen werden. Außerdem müssen Angaben über den verwendeten Testsystemaufbau gemacht werden. Die Abarbeitung dieser Schritte wird anhand eines Leitfadens unterstützt, dabei werden die nötigen Schritte der Reihe nach erklärt und müssen nach Ausführung bestätigt werden.

Nach erfolgreicher Testausführung werden Ausgabedaten wie Messergebnisse, Testbericht und Testurkunden in einem entsprechenden Ordner abgelegt.

Die beschriebene Software wurde exemplarisch implementiert. Dabei wurde die Anbindung der beschriebenen Hardwarekomponenten des Demonstrators realisiert.

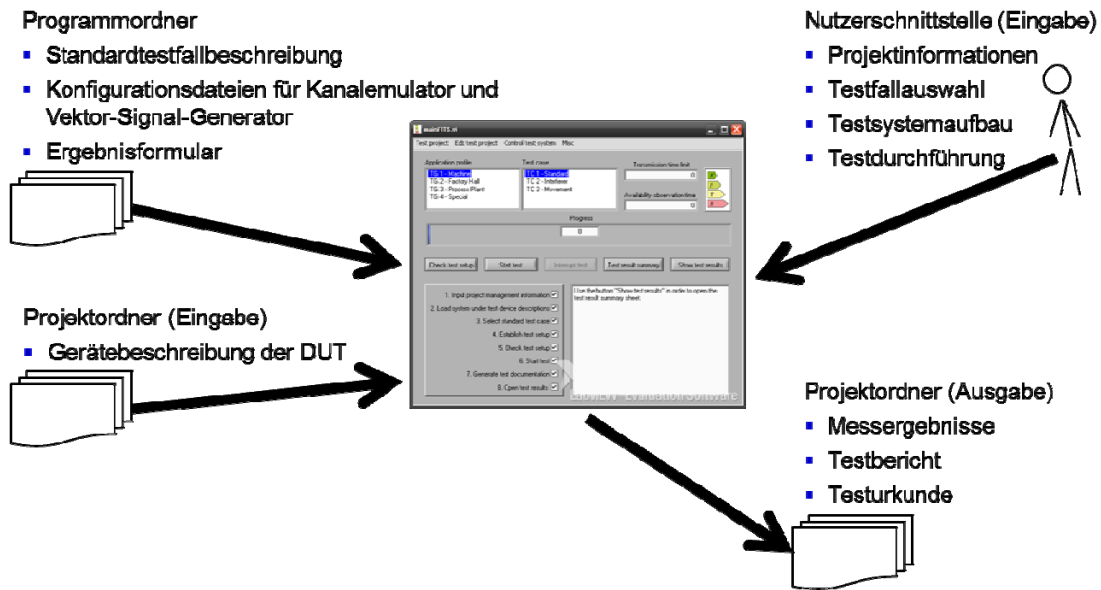


Abbildung 44: Konzept der Testprojektverwaltung

6.8 Prinzipielle Testdurchführung

In Tabelle 36 sind die wesentlichen Schritte des Testablaufs dargestellt. Er umfasst die Testvorbereitung, die Testausführung und die Testauswertung. Ziel war es, die Informationserfassung und das Einwirken weitestgehend zu automatisieren. Es sind allerdings auch manuelle Eingriffe z. B. zur Positionierung von Komponenten erforderlich. In diesen Fällen werden die manuellen Eingriffe durch Interaktion mit der PC-Software unterstützt.

Tabelle 36: Testablauf eines FITS-Standardtests

Testablauf	
Testvorbereitung	
Definition der zu ermittelnden Kenngrößen	
Definition der Kommunikationsschnittstelle(n)	
Auswahl und Zusammenstellung von Testfällen aus einer Testfallbibliothek	
Decken Testfälle den geforderten Testumfang ab?	
nein	Testfalldefinition
	Festlegung der zu ermittelnden Kenngrößen
	Zusammenstellung der Werte relevanter Einflussgrößen
	Aufnahme der Testfälle in die Testfallbibliothek
Analyse der DUT-Beschreibung	
Analyse der Stammdaten und Konfigurationsdaten die ggf. den Testumfang beeinflussen	
Analyse der Hard- und Softwareschnittstelle	
Prüfung der Plausibilität und der Konsistenz aller Eingangsdaten	
Vorbereitung der DUTs	
Anbindung der DUTs an das Testwerkzeug	
Realisierung einer Testanwendung	

Standardeinrichtung der Testumgebung (Ausgangssituation)	
Positionierung der DUTs	
Positionierung und Einrichtung der Testausrüstung und des Testwerkzeuges	
Standardkonfiguration der Testumgebung und der Testanwendung	
Standardkonfiguration der DUTs	
Einrichtung des Kanalemulaors	
Testausführung	
Bis alle Testfälle abgearbeitet	
	Analyse des Testfalls
	Konfiguration der Testumgebung und der Testanwendung
	Verbindungstest
	Konfiguration der DUTs
	Ausführung der Übertragungen lt. Testfall und Ermittlung der Kenngrößen
	Ermittlung der Werte nichtbeeinflussbarer Einflussgrößen
	Speicherung der Kenngrößen
Testauswertung	
Erstellung eines Testprotokolls, das alle testfallrelevanten Werte der Einflussgrößen enthält	
Ermittlung der interessierenden Kenngrößenwerte aus den Messdatenreihen	
Vergleich der Kenngrößenwerte mit Referenzwerten	
Gegenüberstellung der Kenngrößenwerte der einzelnen Testfälle	
Zusammenfassung und Schlussfolgerung	

7 Exemplarische Testergebnisse

7.1 Übersicht

In diesem Kapitel werden exemplarische Testergebnisse von Messungen mit DUTs unterschiedlicher Standards und Hersteller vorgestellt. Die Messungen wurden mit dem Demonstrator des Testsystems durchgeführt.

Ziel war es, in einem ersten Teil die für die Standardtests vorgesehenen Modellbeschreibungen zu *validieren*. Dazu sind zum einen Messreihen unter realen Bedingungen erforderlich, die von den Modellen abgedeckt werden, und zum anderen Messungen mit dem Demonstrator. Die Validierung auf der HF-Ebene wurde in Kapitel 5.3.2 behandelt und exemplarische Ergebnisse der Validierungsmessungen auf der Applikationsebene folgen in Kapitel 7.2. Eine ausführliche Beschreibung der erzielten Ergebnisse findet sich in [13].

Weiterhin wurden die hypothetisch angenommenen Standardtestfälle mittels *Erprobungsmessungen* auf ihre Relevanz hin untersucht. Dafür wurden Messungen mit Funklösungen unterschiedlicher Technologien bzw. für verschiedene Anwendungsbereiche durchgeführt. Ziel war es, die spezifizierten Einflussgrößen auf ihre Relevanz hin zu untersuchen. Dabei wird verschiedenen Fragen nachgegangen, wie z. B.: Ab welcher Entfernung der Funkkomponenten oder ab welcher Nutzdatenlänge verändert sich das Zeitverhalten der Kommunikation signifikant? In 7.3 werden Ergebnisse ausgewählter Erprobungsmessungen vorgestellt. Weitere Ergebnisse sind im Dokument [12] beschrieben.

Die statistischen Parameter, mit deren Hilfe Analyse der Ergebnisse für die folgenden Tests erfolgte, werden in Kapitel 4.2.2 erklärt.

7.2 Exemplarische Ergebnisse der Validierungstests

Tabelle 37 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Validierungsmessungen.

Tabelle 37: Übersicht der Validierungsmessungen

Testgruppe	Standardtestreihe	Testumgebung	Testobjekt	Kommentare
1.1	Maschine	Werkzeugfertigung Weidmüller	Bluetooth	Real, Real mit Störer; Emulation, Emulation mit Störer
2.2	Maschine	Werkzeugfertigung Weidmüller	WISA	Real, Real mit Störer; Emulation, Emulation mit Störer
2.1	Fertigungshalle	Fertigungshalle Phoenix Contact	Bluetooth	Real, Real mit Störer; Emulation, Emulation mit Störer Emulation: vektorielle/statistische Approximation & variables Dämpfungsglied
2.2	Fertigungshalle	Fertigungshalle Phoenix Contact	802.11n	Real, Real mit Störer; Emulation, Emulation mit Störer
2.3	Fertigungshalle	Fertigungshalle Phoenix Contact	802.11g	Real, Real mit Störer; Emulation, Emulation mit Störer Emulation: vektorielle/statistische Approximation & variables Dämpfungsglied
3.1	Prozessautomation Indoor	Testhalle ifak	ZigBee	Real: Statisch, $v = 1\text{m/s}$, $v = 0,05\text{m/s}$; Emulation: Statisch, $v = 1\text{m/s}$, $v = 0,05\text{m/s}$

3.2	Prozess-automation Outdoor	Außengelände ifak	Trusted Wireless	Real, Emuliert;
4.1	Spezial- applikation	Fahrstuhlschacht HS OWL	802.11g	Real: LOS,NLOS; Emulation: LOS, NLOS, vektorielle/statistische Approximation & variables Dämpfungsglied
4.2	Spezial- applikation	Fahrstuhlschacht HS OWL	Bluetooth	Real: LOS,NLOS; Emulation: LOS, NLOS, vektorielle/statistische Approximation & variables Dämpfungsglied

7.2.1 Testreihe Maschine – WISA

Die Messungen in der realen Umgebung für diese Testreihe wurden in der Werkzeugproduktion eines Automatisierungsunternehmens durchgeführt. Die Entfernung der getesteten Funkgeräte war dabei 7,5 m, die Entfernung zwischen Störer und dem Test-Consumer betrug 1,5 m. Das Testszenario sollte die Bedingungen in einer typischen Fertigungszelle widerspiegeln. Abbildung 45 zeigt ein Foto der Messumgebung für die realen Messungen und Abbildung 46 eine Karte mit den Positionen der DUT und der Störer.



Abbildung 45: Foto der Messumgebung Testreihe Maschine

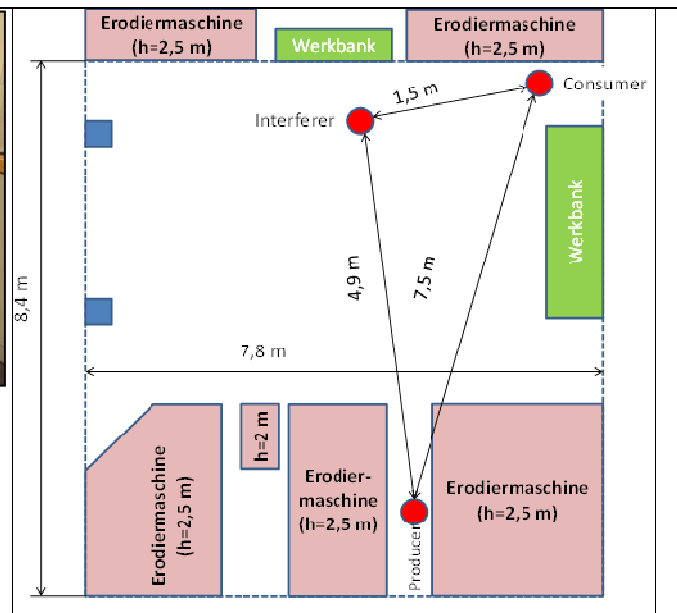


Abbildung 46: Karte der Messumgebung Testreihe Maschine

Als Störer diente ein vom VSG erzeugtes 802.11g Signal mit einer Medienbelegung von 50%. Der Störer belegte einen WLAN-Kanal. Da beide getesteten Systeme Frequency-Hopper waren, war die genaue Position des WLAN-Kanals nicht relevant. Die Emulation des Funkkanals erfolgte nur frequenzvariant, die zeitliche Variation des Funkkanals wurde nicht berücksichtigt. Als Emulationsmethode kam die „vektorielle Approximation zum Einsatz.

Der Funkkanal war in allen Testfällen unkritisch, das Bluetooth-System besaß eine Verbindungsreserve von $M = 43$ dB und das WISA-System eine Verbindungsreserve von $M = 31$ dB. Bei den Störern herrschte jeweils ein unkritisches SIR von Sender und Störer von 20 dB.

7 Exemplarische Testergebnisse

Die Vergleiche anhand der Histogramme der Testgruppe WISA sind in Tabelle 38 und die Vergleiche anhand der statistischen Parameter in Abbildung 47 dargestellt.

Die Histogramme zeigen, dass hier eine nahezu perfekte Übereinstimmung von realer Messung und Emulatormessung gelungen ist.

Tabelle 38: Vergleich t_{TT} und t_{UT} – Maschine – WISA (M = 31 dB)

	Reale Umgebung	Kanalemulator
Übertragungszeit		
Aktualisierungszeit		

Bei dieser Testgruppe gibt es mit einer Ausnahme auch eine perfekte Übereinstimmung der statistischen Parameter. Einzig die Standardabweichung der Aktualisierungszeit weicht bei dem Testfall ohne Störsystem in der Emulation um 3 % von dem realen Wert ab.

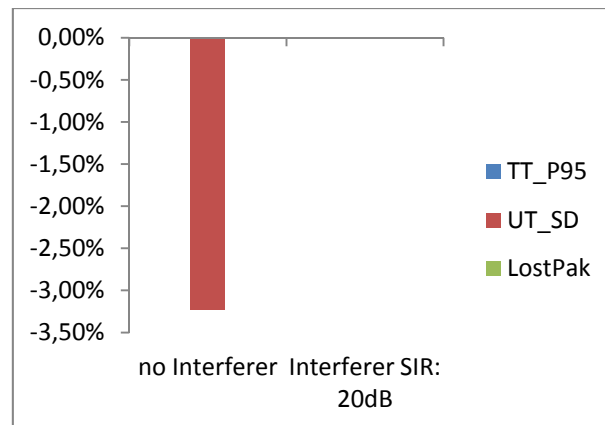


Abbildung 47: Validierung real – emuliert: Maschine – WISA-DUTs (M = 31 dB)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das vorgestellte Testsystem für den Standard WISA in der Umgebung einer Fertigungszelle sehr gut geeignet ist, die realen Bedingungen zu emulieren. Es gab nahezu keine Abweichungen zwischen den Ergebnissen in der Realität und in der Emulation.

7.2.2 Testreihe Fertigungshalle – Bluetooth

Die Messungen in realer Umgebung für diese Testreihe wurden in einer Fertigungshalle eines Automatisierungsunternehmens durchgeführt. Die Entfernung der getesteten Funkgeräte betrug dabei 72 m, die Entfernung zwischen Störer und dem Testconsumer war 6 m. Das Testszenario sollte die Bedingungen in einer typischen Fertigungshalle widerspiegeln. In Abbildung 48 ist ein Foto der realen Messumgebung zu sehen und Abbildung 49 zeigt eine Karte der Umgebung mit den Positionen der DUT und des Störers.

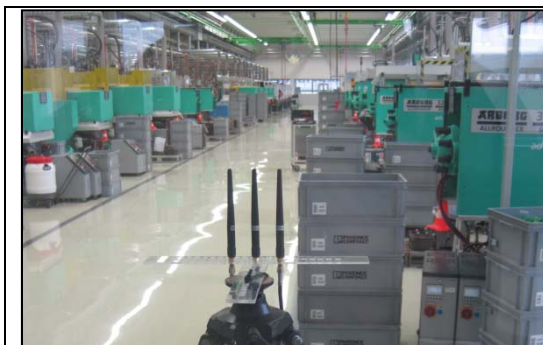


Abbildung 48: Foto der Messumgebung
Testreihe Fertigungshalle

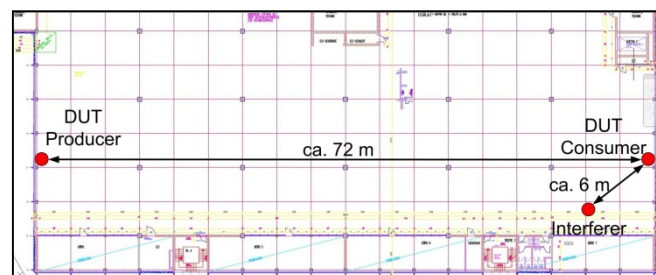
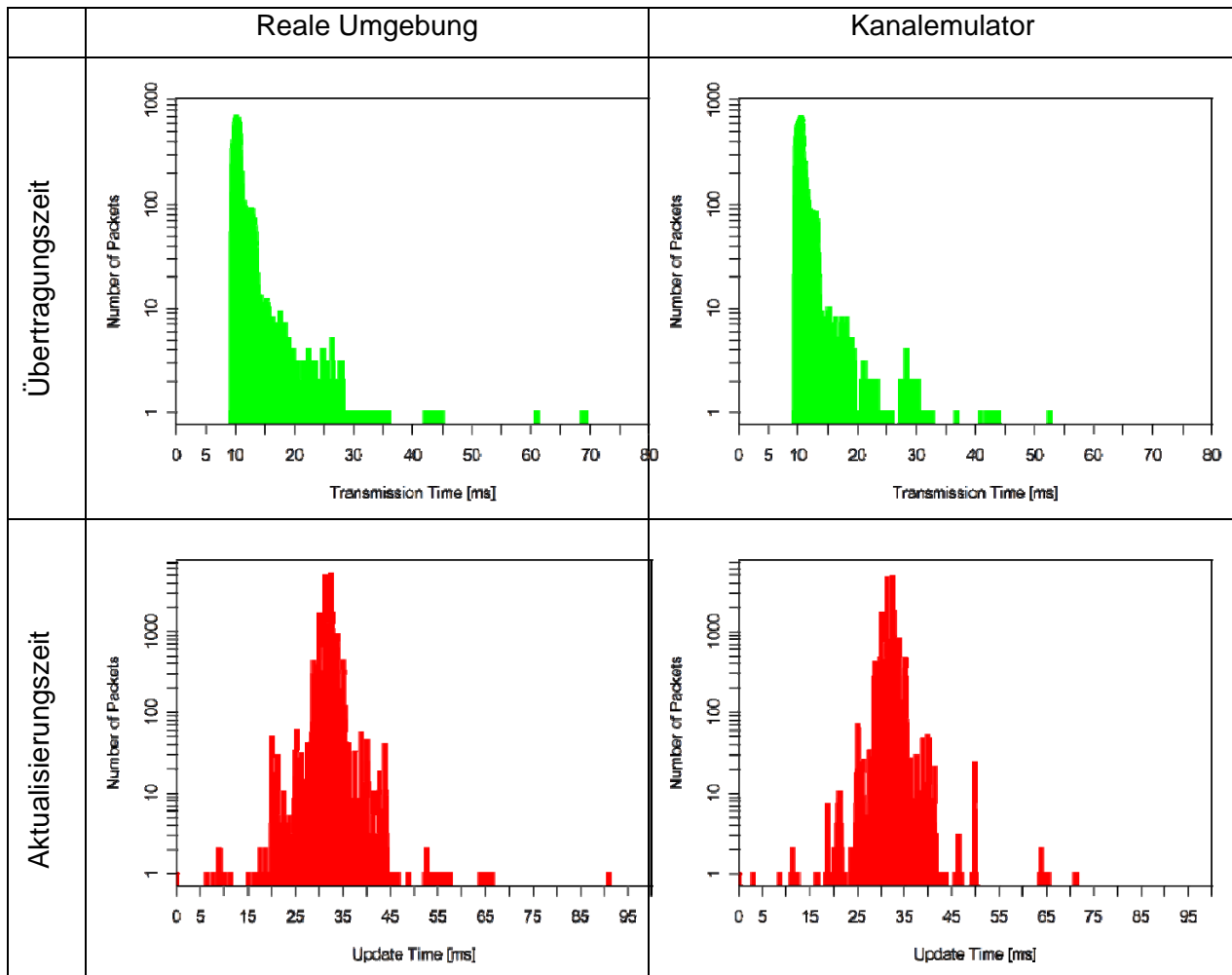


Abbildung 49: Karte der Messumgebung
Testreihe Fertigungshalle

Für die einzelnen Testfälle wurden von dem VSG unterschiedliche Störsysteme emuliert. Die Emulation des Funkkanals erfolgte nur frequenzvariant, die zeitliche Variation war vernachlässigbar. Bei den Emulationsmethoden wurden unterschiedliche Parameterextraktionsverfahren eingesetzt, die im Folgenden verglichen werden.

Die Vergleiche der Histogramme der Testgruppe Bluetooth sind in Tabelle 39 und die Vergleiche anhand der statistischen Parameter in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt.

Tabelle 39: Vergleich t_{TT} und t_{UT} – Fertigungsumgebung – Bluetooth ($M = 6$ dB)

Trotz der geringen Verbindungsreserve von lediglich $M = 6$ dB belegen die Histogramme in Tabelle 39 eine sehr gute qualitative Übereinstimmung zwischen dem Betrieb in realer Umgebung und der Emulation. Die Unterschiede zwischen Messungen gleicher Bluetooth-Systeme in verschiedenen Umgebungen sind deutlich stärker als die Unterschiede der Messung zwischen realer Umgebung und ihrer Emulation.

In Abbildung 50 wurde die Übereinstimmung von Messungen mittels der 3 Emulationsmethoden für den frequenzvarianten Funkkanal mit den Ergebnissen der Messung in der Realität verglichen. Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs von Messungen mit einem 802.11g-Störsystem in der Realität und am Emulator.

Die Ergebnisse aller Messungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Paketverluste. Weder in der Realität noch am Emulator sind Paketverluste aufgetreten. Die Abweichung des P95-Werts der Übertragungszeit ist niemals größer als 4% und somit durchweg sehr gut. Die Abweichungen der Standardabweichung der Aktualisierungszeit sind etwas größer. Dies liegt daran, dass dieser Wert betragsmäßig sehr klein ist und sich teilweise an der Grenze der Messempefindlichkeit bewegt, daher können kleine betragsmäßige Änderungen starke prozentuale Veränderungen bewirken.

In Abbildung 50 zeigt die Methode der statistischen Approximation die beste Übereinstimmung mit der Realität, der Vorteil gegenüber den anderen Methoden ist aber nicht sehr groß. Mit Ausnahme der Standardabweichung der Aktualisierungszeit ist die Übereinstimmung aller Parameter sehr gut. Mit einer maximalen Abweichung unter 15 % ist aber auch dieser Parameter als gut zu bezeichnen.

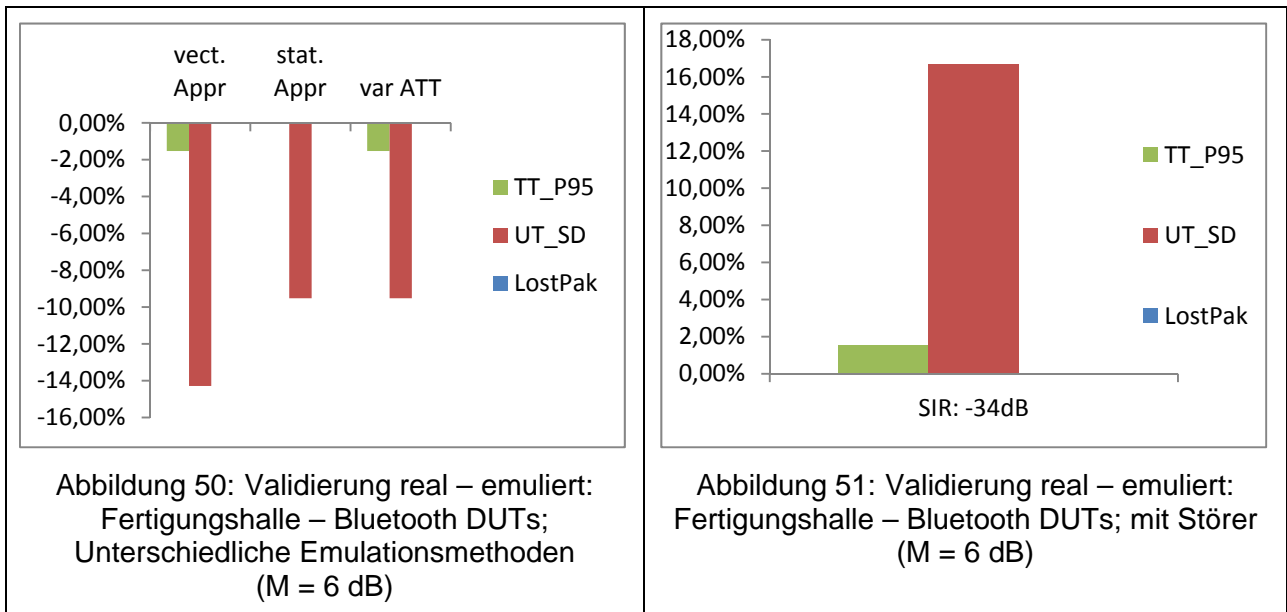


Abbildung 51 zeigt die Übereinstimmung für den Fall, dass ein Störer die Kommunikation beeinflusst. Trotz des negativen *SIR*, d.h. das Störsignal ist 34 dB stärker als das Nutzsignal am Consumer, ist hier die Übereinstimmung aller Parameter recht gut. Eine Ausnahme bildet auch hier die Standardabweichung der Aktualisierungszeit. Die stärkere Abweichung dieses Parameters ist durch den kleinen Wert an der Grenze der Messgenauigkeit verursacht.

Die Fertigungshalle stellte die Herausforderung, dass die räumlichen Dimensionen des Funkkanals sehr groß waren. Dies führte bei allen DUT zu einer geringeren Verbindungsreserve. Bei Bluetooth schnitt bei dem Vergleich der Emulationsmethoden die vektorielle Approximation am besten ab. Bei dem Testfall zeigt sich, dass eine Emulation mittels variablen Dämpfungsglieds nicht ausreicht.

Für den Test war als Störer ein WISA System mit einem Duty-Cycle von 100% aktiv und es herrschte ein kritisches Signal-to-Noise-Ratio (SNR) vor. Trotzdem sind bei dem Bluetooth-System die Abweichungen nicht viel höher als im ungestörten Fall.

Insgesamt haben sich die Emulationsverfahren, und dabei besonders die statistische Approximation, als tauglich für eine realistische Emulation der realen Bedingungen erwiesen.

7.3 Exemplarische Ergebnisse der Erprobungstests

Tabelle 40 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Erprobungsmessungen.

Tabelle 40: Übersicht über die durchgeführten Erprobungsmessungen

Testgruppe	Testobjekt	Beschreibung
1	802.11g, Bluetooth	Untersuchung des Einflusses von zeit- und frequenzvarianten Funkkanälen auf industrielle Funkgeräte
2	802.11g, Bluetooth	Erprobungsmessung mit unterschiedlichen Entfernungen der DUTs
3	802.11g	Untersuchung der Abweichungen der Emulation bei WLAN-Störern mit unterschiedlichen Sendeleistungen
4	802.11g	Untersuchung der Abweichungen der Emulation bei WLAN-Störern mit unterschiedlichen Aktivzyklen (Duty cycle)
5	Bluetooth	Erprobungsmessung mit unterschiedlichen Sendezeitabständen der Testanwendung

6	802.11g	Ermittlung eines „Golden Device“ – Referenzgeräts
7	802.11g, Bluetooth	Erprobungsmessung mit unterschiedlichen Hard- und Softwareversionen
8	802.11g, Bluetooth	Reproduzierbarkeit von Messungen in realer Umgebung
9	802.11g, Bluetooth	Vergleich mehrerer Messungen am Emulator bei gleichbleibenden Einflussgrößen

7.3.1 Untersuchung des Einflusses von zeit- und frequenzvarianten Funkkanälen auf industrielle Funkgeräte

In diesem Kapitel wurden die Auswirkungen von zeit- und frequenzvarianten Funkkanälen auf industrielle Funkgeräte untersucht. Die verwendeten Funkkanäle wurden von einem echtzeitfähigen Funkkanalemulator emuliert. Dabei wurde gezeigt, dass sich Zeit- und Frequenzvarianz im Funkkanal auf die Performance der Funkgeräte auf der Applikationsebene auswirken.

Bei der Analyse wurden immer zwei Messungen miteinander verglichen. Diese Messungen haben beide denselben Median der Übertragungsfunktion, unterscheiden sich jedoch in der Zeit- bzw. der Frequenzvarianz. Hierbei ist jeweils ein Verlauf zeit- bzw. frequenzvariant und der andere zeitkonstant bzw. frequenzflach. Die Mediane für die Messungen wurden entsprechend der Verbindungsreserve (Link Margin) bestimmt, welche sich aus der Sendeleistung des Senders der Empfindlichkeit des Empfängers und dem Median der Übertragungsfunktion des Funkkanals zusammensetzt. Die Verbindungsreserve M ergibt sich als

$$M_{\text{dB}} = P_{\text{T,dBm}} - MDS_{\text{dBm}} + H_{\text{Median,dB}} \quad (10)$$

mit $P_{\text{T,dBm}}$: Sendeleistung des DUT Producers, MDS_{dBm} : Empfindlichkeit des DUT Consumers und H_{Median} : Median der Übertragungsfunktion. Zahlenbeispiel: $P_{\text{T}} = 10 \text{ dBm}$, $MDS = -70 \text{ dBm}$, $H_{\text{Median}} = -60 \text{ dB}$, $M = 20 \text{ dB}$.

Die Werte der untersuchten Verbindungsreserve sind 0dB, 5dB und 20 dB. Die Annahme ist, dass bei der geringsten Verbindungsreserve der Einfluss von Zeit- und Frequenzvarianz am höchsten sein wird, da hier das Funksystem an seiner Systemgrenze betrieben wird.

7.3.1.1 Untersuchung von WLAN DUTs

Als Ergebnisse wurden hier exemplarisch nur die Werte des statistischen Parameters TT_{P95} gezeigt. Weitere Ergebnisse finden sich in Dokument [12].

Die Ergebnisse dieser Testgruppe sind in Abbildung 52 und Abbildung 53 zusammengefasst. Es ist zu sehen, dass sich alle statistischen Parameter trotz gleichem Median deutlich unterscheiden. Der stärkste Unterschied tritt dabei jeweils bei einer Verbindungsreserve von 0dB auf und wird mit zunehmender Verbindungsreserve geringer. Dieses Verhalten tritt auch bei allen anderen statistischen Parametern auf.

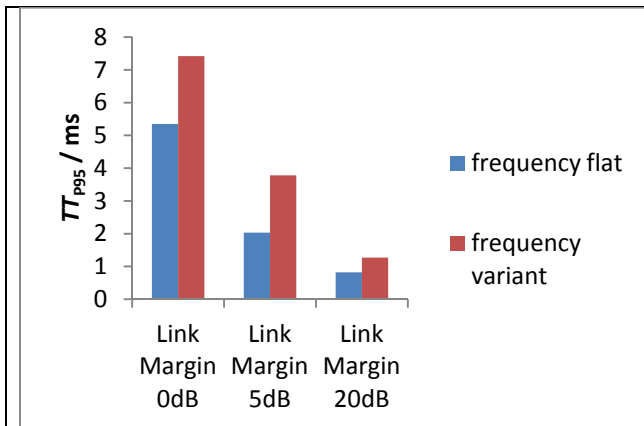


Abbildung 52: Vergleich WLAN TT_{P95}: Frequenzflach – frequenzvariant

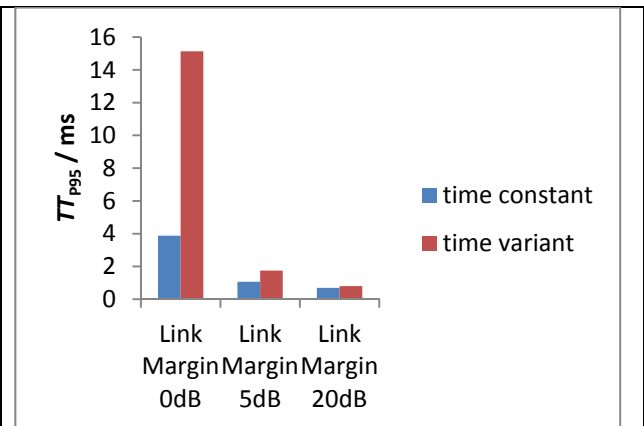


Abbildung 53: Vergleich WLAN TT_{P95}: Zeitkonstant – zeitvariant

Vergleicht man den Einfluss von Frequenzvarianz und Zeitvarianz, so stellt man fest, dass der Einfluss der Zeitvarianz deutlich stärker als der Einfluss der Frequenzvarianz ist.

Die Performance der WLAN DUTs ist bei den zeit- und frequenzvarianten Funkkanälen immer schlechter als bei einem zeit- und frequenzinvarianten Kanal.

7.3.1.2 Untersuchung von Bluetooth DUT

Die Grafiken zu den Vergleichen dieser Testgruppe sind in Abbildung 54 und Abbildung 55 zu sehen. Im Gegensatz zu Testgruppe 1 wurden hier Bluetooth DUTs für den Test verwendet. Auch hier tritt der Effekt auf, dass Zeitvarianz und Zeitkonstanz bzw. Frequenzvarianz und Frequenzinvarianz nahe der Systemgrenze die größte Rolle spielen. Bei größerer Verbindungsreserve verkleinert sich die Differenz der entsprechenden statistischen Parameter stark. Wie bei dem Test der WLAN-DUTs werden hier nur die Werte des statistischen Parameters TT_{P95} gezeigt. Weitere Ergebnisse finden sich in Dokument [12].

Bluetooth-DUTs zeichnen sich im Gegensatz zu den WLAN-DUTs dadurch aus, dass die Performance bei Zeit- und Frequenzvarianz besser ist als bei entsprechenden frequenzflachen bzw. zeitkonstanten Funkkanälen. Dieser Effekt tritt jedoch nur an der Systemgrenze bei einer Verbindungsreserve von 0dB auf. Bei größerer Verbindungsreserve werden die Unterschiede zwischen den zwei Varianten viel geringer.

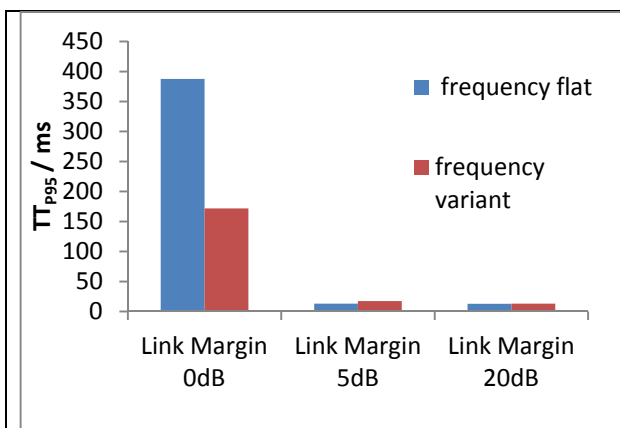


Abbildung 54: Vergleich BT TT_{P95}: Frequenzflach – frequenzvariant

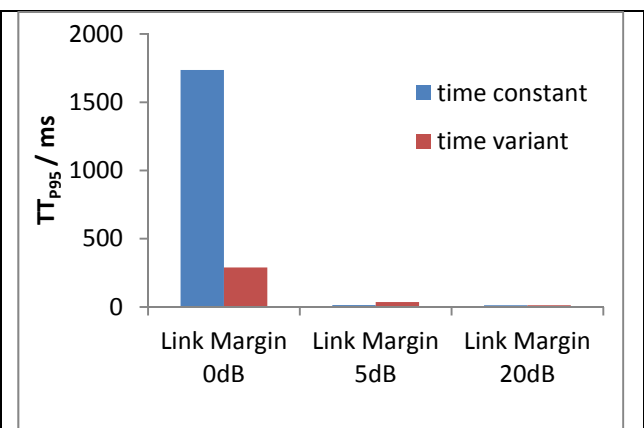


Abbildung 55: Vergleich BT TT_{P95}: Zeitkonstant – zeitvariant

7.3.1.3 Bewertung der Ergebnisse

Mit diesen Tests konnte gezeigt werden, dass der Einfluss von Zeit- und Frequenzvarianz bei steigendem Link Margin abnimmt. Dieser Effekt trat sowohl bei WLAN als auch bei Bluetooth auf.

Bei WLAN weisen die Testfälle mit Zeit- bzw. Frequenzvarianz eine viel schlechter Performance als die zeitkonstanten bzw. frequenzflachen Testfälle auf. Bei Bluetooth lässt sich der umgekehrte Effekt feststellen. Daraus lässt sich schließen, dass Bluetooth besser als WLAN für stark reflektierende und bewegte industrielle Umgebungen geeignet ist.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass für WLAN und Bluetooth der Einfluss von Zeitvarianz stärker ist als der von Frequenzvarianz. Dies lässt den Schluss zu, dass zeitlich schwankende Umgebungen eine höhere Anforderung an die untersuchten Funkstandards stellen als Umgebungen, die Funkwellen nur stark streuen.

Zeit- und Frequenzvarianz beeinträchtigen die Performance von WLAN und Bluetooth an der Systemgrenze sehr stark. Hierbei ist die Emulation von Zeit- und Frequenzvarianz unabdingbar. Bei einer großen Verbindungsreserve hingegen ist Emulation des Funkkanals auch mit einem variablen Dämpfungsglied oft ausreichend.

7.3.2 Erprobungsmessung mit unterschiedlichen Entfernungen der DUTs

In dieser Testreihe wurde der Einfluss von unterschiedlichen Entfernungen zwischen Producer und Consumer auf das Verhalten eines Testsystems untersucht. Erneut wurden Bluetooth und WLAN gewählt. Die verschiedenen Entfernungen wurden mit Hilfe eines elektronisch einstellbaren Dämpfungsgliedes emuliert. Im Gegensatz zu einer Messung in einer realen Umgebung hat die Emulation den Vorteil, dass lediglich der Einfluss der Entfernung eingeht und alle anderen Einflussgrößen konstant bleiben.

Die Bluetooth-Geräte wurden mit einem Sendezeitabstand von 32 ms betrieben. Bei den WLAN-Geräten wurde ein zufälliger Sendezeitabstand von 15-25 ms eingestellt.

7.3.2.1 Untersuchung von Bluetooth DUT

Die Ergebnisse dieser Testreihe sind in Abbildung 56 zu sehen. Aus der eingestellten Dämpfung des Funkkanals wurde ein äquivalenter idealer Freiraumabstand berechnet und als unabhängige Variable aufgetragen. Zusätzlich wurde vergleichend die Verbindungsreserve eingetragen.

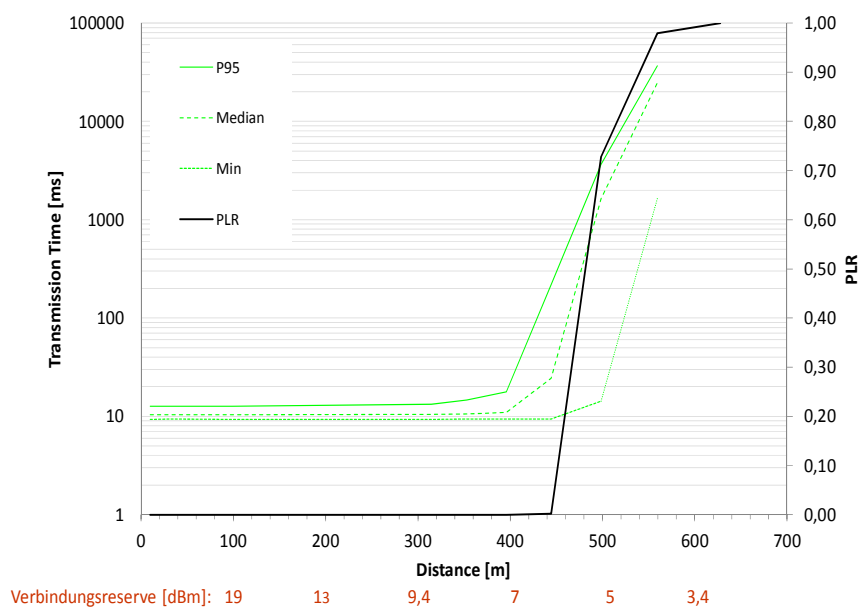


Abbildung 56: TT und PLR für verschiedene Entfernungen bei Bluetooth

Die Abbildung zeigt, dass das Fehler- und Übertragungsverhalten bis zu einer Entfernung von etwa 300 m sehr stabil ist. Als Richtwert dient die Verbindungsreserve. Eine stabile Kommunikationsverbindung wird bei einer Reserve größer 10 dBm gewährleistet. Bei einer Entfernung von mehr als 300 m beginnen die statistischen Parameter für die Übertragungszeit anzusteigen. Bei einer Entfernung von über 400 m nimmt der Anstieg stark zu. In diesem Bereich nimmt auch die PLR stark zu.

7.3.2.2 Untersuchung von WLAN DUT

Die Ergebnisse dieser Testreihe sind in Abbildung 57 zu sehen. Die Abbildung zeigt, dass das Fehler- und Übertragungsverhalten bis zu einer Entfernung von etwa 200 m sehr stabil ist. Bei einer Entfernung von mehr als 200 m beginnen die statistischen Parameter für die Übertragungszeit anzusteigen. Bei einer Entfernung von über 250 m nehmen vor allem der Median und das Perzentil 95 der Übertragungszeit stark zu. In diesem Bereich steigt auch die PLR stark an.

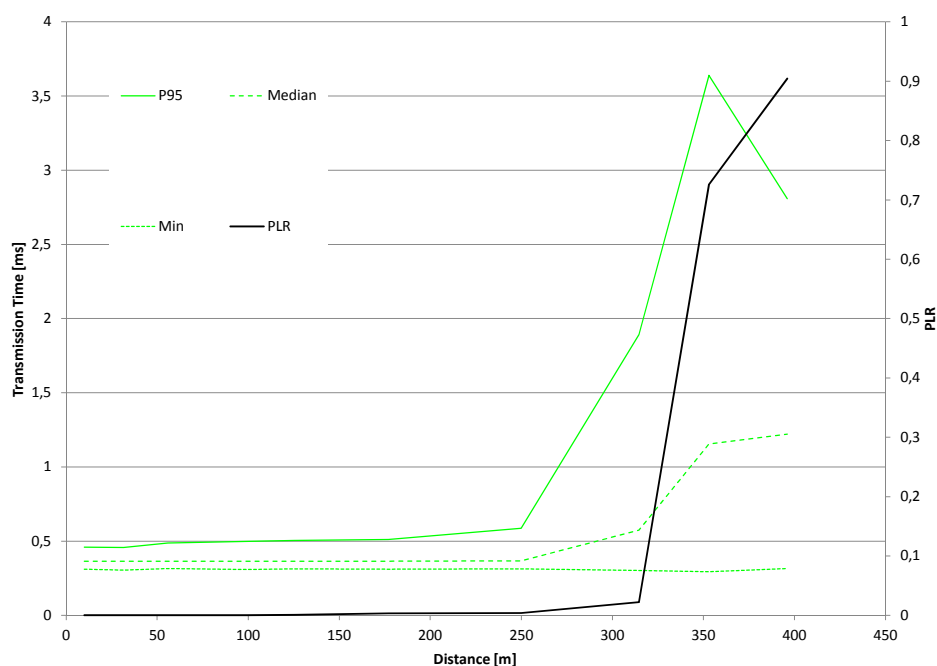


Abbildung 57: TT und PLR für verschiedene Entfernungen bei WLAN

7.3.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Funkssysteme, die für einen Einsatz in der industriellen Automation ausgelegt sind, bis zu Entfernungen entsprechend einer Verbindungsreserve von ca. 10 dB ein sehr stabiles Übertragungsverhalten aufweisen. Bis zu dieser Grenze treten keine Paketverluste auf. Die äquivalente Freiraum-Entfernungsgrenze beträgt bei WLAN etwa 200 m und bei Bluetooth etwa 300 m. Dieser Entfernungswert, und damit die Verbindungsreserve, hängt sehr stark von der Sendeleistung und der Empfängerempfindlichkeit der Geräte ab. Bei größerer Entfernung, d.h. kleinerer Verbindungsreserve als 10 dB, steigen die statistischen Parameter der Übertragungszeit stark an und auch die Paketverluste nehmen sehr stark zu.

7.4 Definition und Spezifikation von Performance-Klassen

Nach der Definition von Anwendungsprofilen und der Herleitung von Standardtestfällen ist für einen einfacheren Vergleich von drahtlosen Funklösungen die Einführung von Performance-Klassen sinnvoll. Dies ist nicht nur für die Hersteller, sondern auch für die Anwender, die die Funklösung auswählen und einsetzen, wichtig. Die Performance-Klassen verraten auf einen

Blick, ob die jeweilige Funklösung die Anforderungen der Automatisierungsanwendung erfüllt. Der Anwender muss bei der Planung seines drahtlosen Netzes also wissen, zu welchem Anwendungsprofil seine Applikation gehört, und kann dann anhand der Performance-Klassen ein geeignetes System auswählen. Unnötige Komplikationen bei der späteren Inbetriebnahme werden vermieden. Die Hersteller können ebenfalls überprüfen, in wie weit die Anforderungen der Applikationsprofile erfüllt werden können. Zusätzlich bekommen die Hersteller eine Angabe, wie weit sie von der nächstbesseren Performance-Klasse entfernt sind.

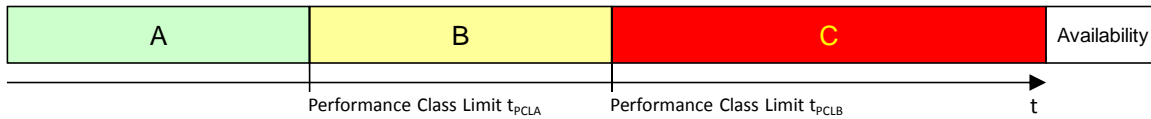


Abbildung 58: Performance-Klassen

Es ist sinnvoll, sich auf drei Performance-Klassen zu beschränken (siehe Abbildung 58):

- Performance-Klasse A: Die Anforderungen der Anwendung werden erfüllt.
- Performance-Klasse B: Die Anforderungen der Anwendung werden mit akzeptabler Toleranz erfüllt.
- Performance-Klasse C: Die Anforderungen der Anwendung werden nicht erfüllt.

Zur Festlegung der Klassengrenzen müssen die Einflussgrößen der Anwendungsprofile berücksichtigt werden. Dabei spielen im Wesentlichen nur die Anzahl der logischen Verbindungen des Netzwerks n_{LL} und das anwendungsbezogene Sendezeitintervall t_{TI} eine Rolle. Für die Definition der Performance-Klassen-Grenzen wird die obere Grenze für die Übertragungszeit je Verbindung t_{PCLA} eingeführt:

$$t_{PCLA} = \frac{t_{TI}}{n_{LL}} \quad (11)$$

Weiterhin ist auch die Toleranzgrenze t_{PCLB} von Nöten:

$$t_{PCLB} = F_{Tolerance} \cdot \frac{t_{TI}}{n_{LL}} \quad (12)$$

wobei $F_{Tolerance}$ den Faktor für die akzeptable Toleranz darstellt.

Um eine Funklösung einer Performance-Klasse zuweisen zu können, werden die in den Standardtests ermittelten Kenngrößenwerte genutzt. Als Kenngrößen werden die Übertragungs- und Aktualisierungszeit verwendet (siehe Abschnitt 4.2.1). Als statistische Kennwerte der Kenngrößen sind das Perzentile 95 der Übertragungszeit und die Standardabweichung der Aktualisierungszeit von Interesse (siehe Abschnitt 4.2.2).

Als Vorschlag für die Aufteilung der Performance-Klassen werden folgende Annahmen getroffen:

$$F_{Tolerance} = 2 \quad (13)$$

$$PerformanceclassA := P95(t_{TT}) + \sigma(t_{UT}) < t_{PCLA} \quad (14)$$

$$PerformanceclassB := t_{PCLA} \leq P95(t_{TT}) + \sigma(t_{UT}) < t_{PCLB} = F_{Tolerance} \cdot t_{PCLA} \quad (15)$$

$$PerformanceclassC := P95(t_{TT}) + \sigma(t_{UT}) \geq t_{PCLB} = F_{Tolerance} \cdot t_{PCLA} \quad (16)$$

Das heißt, wenn die Summe aus Perzentil 95 der Übertragungszeit und der Standardabweichung der Aktualisierungszeit unter der oberen Grenze der Übertragungszeit je Verbindung t_{PCLA} liegt, erfüllt die getestete Funklösung die Anforderung der Anwendung und wird der Performance-Klasse A zugewiesen. Liegt die genannte Summe nur unter der Toleranz-

grenze, so werden die Anforderungen akzeptabel bedient und die Funklösung wird der Klasse B zugewiesen. Wird auch diese Grenze überschritten, liegt das getestete System in der Klasse C.

Die sich daraus ergebenden Performance-Klassen-Grenzen der einzelnen Applikationsprofile sind in Tabelle 41 aufgelistet.

Tabelle 41: Performance-Klassen-Grenzen der einzelnen Applikationsprofile

	Machine	Factory hall	Process plant	Special
Number of logical links	16	50	100	1
Transmission interval [ms]	100	250	4000	50
Performance class limit A [ms]	6,25	5	40	50
Performance class limit B [ms]	12,5	10	80	100

7.5 Beispiel für die Testergebnisdarstellung mittels Performance-Klassen

Tabelle 42 zeigt beispielhaft eine Übersicht über ausgewählte Testergebnisse und die daraus resultierende Zuordnung zu den Performance-Klassen. Dazu wurden die Ergebnisse aus den Validierungsmessungen verwendet. In der Tabelle werden die Applikationsprofile und die Testfälle aufgelistet. Weiterhin sind auch die statistischen Kennwerte der Kenngrößen Übertragungszeit und Aktualisierungszeit aufgeführt. In der Spalte „Time“ wird der Wert der Summe aus Perzentil 95 der Übertragungszeit und der Standardabweichung der Aktualisierungszeit dargestellt. Entsprechend dieses Wertes erfolgt die Zuweisung zu einer Performance-Klasse. Wichtig ist die zusätzliche Angabe der Verfügbarkeit. Somit wird eine Aussage nicht nur über das Zeit-, sondern auch über das Fehlverhalten getroffen.

Tabelle 42: Beispiele für Performance-Klassen aus den Validierungstests

Standard TG name	Standard TC name	TT		UT		Symbol	Performance class			Availability
		Mode	P95	Mean	SD		Time			
Machine	Standard	35,7	45,9	100,4	16,9	✘	62,8		C	99,52%
Machine	Interferer	15,8	18,9	40,0	3,4	✘	5,6		A	100,00%
Factory hall	Standard	10,2	12,8	32,0	1,6	✘	14,4		C	100,00%
Factory hall	Standard	0,3	2,4	31,9	2,1	✓	4,5		A	99,96%
Factory hall	Interferer	0,3	2,5	33,0	6,0	!	8,5		B	97,92%
Factory hall	Standard	0,4	0,6	32,0	0,3	✓	0,9		A	100,00%
Factory hall	Interferer	0,6	4,2	32,2	6,7	✘	10,9		C	99,53%
Factory hall	Interferer	0,5	3,6	32,0	5,0	!	8,6		B	99,94%
Process plant	Indoor - Movement	23,2	25,0	50,2	4,8	✓	29,8		A	99,96%
Process plant	Indoor - Movement	22,6	24,7	53,5	124,5	✘	149,2		C	96,01%
Special	Standard	0,4	0,5	10,0	0,2	✓	0,6		A	100,00%
Special	Standard	10,7	28,1	50,0	11,5	✓	39,6		A	100,00%

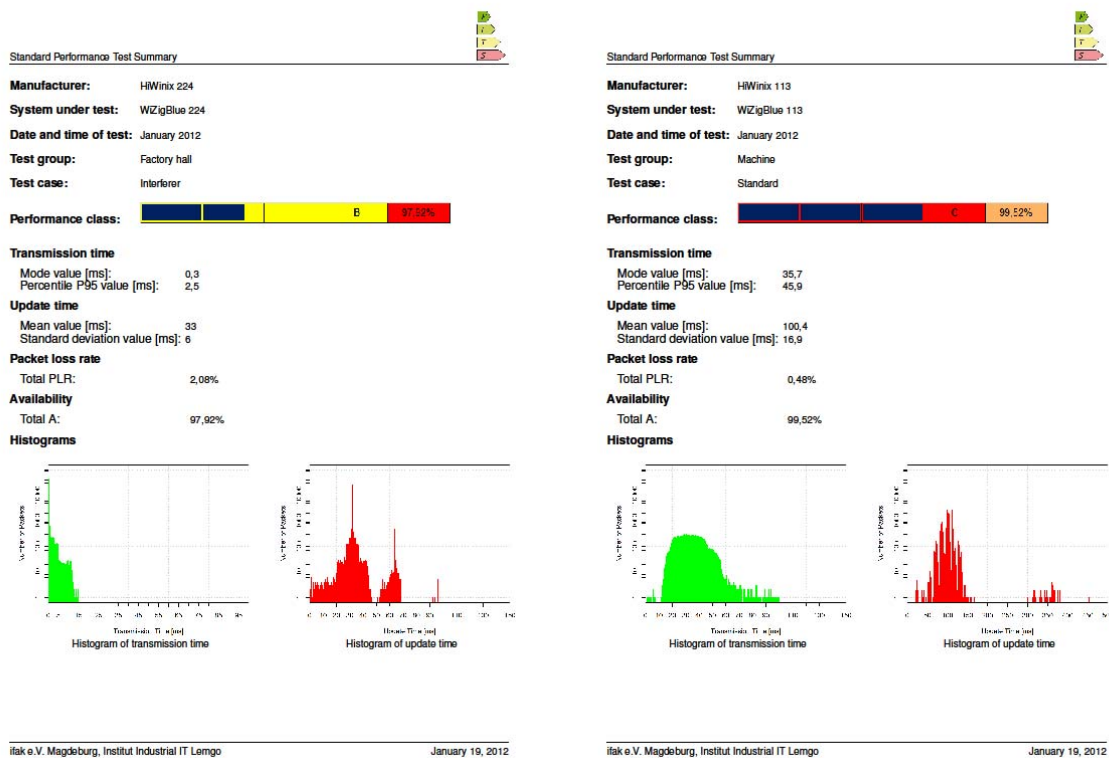


Abbildung 59: Testergebnisdarstellung

Abbildung 59 zeigt zwei beispielhafte Testergebnisdarstellungen. Dabei wird dasselbe System für zwei unterschiedliche Anwendungsprofile und Testfälle untersucht. Neben der Angabe des Herstellers und des getesteten Systems erfolgt auch die Angabe des Datums und der Zeit des Tests sowie die Testgruppe und der Testfall. Des Weiteren wird die Zuordnung zur Performance-Klasse dargestellt. Ein Balken zeigt an, in welchem Bereich man sich in der ermittelten Performance-Klasse befindet. So kann der Abstand zu einer besseren oder schlechteren Klasse sehr gut abgeschätzt werden. Auf der Testergebnisdarstellung werden auch die wichtigsten statistischen Kennwerte der Übertragungszeit und Aktualisierungszeit aufgeführt. Zusätzlich wird der ermittelte Wert der Paketverlustrate und der Verfügbarkeit aufgelistet. Im unteren Bereich der Testergebnisdarstellung befinden sich die Histogramme für die Übertragungs- und Aktualisierungszeit.

Mit der vorgestellten Testergebnisdarstellung erhalten der Hersteller und der spätere Anwender die wichtigsten Kennwerte des Zeit- und Fehlerverhaltens des getesteten Systems in einer ansprechenden Zusammenfassung. Somit wird schnell deutlich, ob sich die untersuchte Lösung für einen bestimmten Anwendungsfall eignet oder nicht. Auch mögliche Probleme oder Optimierungspotenziale für die weitere Entwicklung eines industriellen Funksystems werden offenbart.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens definierten Standardtestfälle (Maschine, Fertigungshalle, Prozessautomation innen/außen, Fahrstuhlschacht als Spezialapplikation) haben eine sehr hohe Akzeptanz gefunden. Dies wurde im Verlauf zahlreicher Diskussionen mit den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses und weiteren Firmen des GMA-Fachausschusses 'Funkgestützte Kommunikation' und des ZVEI-Arbeitskreises 'Wireless Automation' bekräftigt.

Basierend auf repräsentativen Messungen in realen Umgebungen wurden für diese Standardtests geeignete Modellbeschreibungen und Testverfahren entwickelt und mit Validierungs- und Erprobungsmessungen verifiziert.

Für die Entwicklung der Modellbeschreibungen wurden zunächst Hochfrequenzmessungen der realen Funkkanäle durchgeführt. Daraus wurden geeignete Parameter für eine echtzeitfähige Kanalemulation abgeleitet. Mit umfangreichen Tests wurden diese Modellbeschreibungen anschließend validiert. Dazu wurden applikationsspezifische Messungen der Kenngrößen von Funksystemen in realer Umgebung durchgeführt und anschließend mit im Labor durchgeführten Emulatorenmessungen verglichen. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass alle Standardtestfälle mit den Emulatorenmessungen abgedeckt werden können.

Anschließend wurden die definierten Standardtestfälle mittels Erprobungsmessungen auf ihre Relevanz bezüglich der dominierenden Einflussgrößen hin untersucht. Dafür wurden Messungen mit Funklösungen unterschiedlicher Technologien bzw. für verschiedene Anwendungsbereiche durchgeführt. Hiermit konnte die Relevanz der spezifizierten Einflussgrößen verifiziert werden.

Mit den erfolgreich entwickelten Testverfahren dieses Forschungsvorhabens haben nun Hersteller die Möglichkeit, durch Labormessungen frühe Aussagen über die Leistungsfähigkeit ihrer Funksysteme für eine bestimmte Anwendungsklasse und -umgebung zu treffen. Da die Emulatorenmessung im Gegensatz zu Messungen in realen Umgebungen deterministisch und damit reproduzierbar ist, können z. B. verschiedene Hard- und Softwareversionen vergleichend getestet werden. Dies ist mit Messungen in einer realen Umgebung nicht möglich.

Die vorgeschlagenen Performance-Klassen A, B, C mit einer zusätzlichen Angabe der absoluten und zeitabhängigen Verfügbarkeit bieten Herstellern und Anwendern die Möglichkeit, für eine bestimmte Anwendungsklasse eine optimale Funklösung zu entwickeln bzw. auszuwählen.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wurden und werden weiterhin umfangreich dokumentiert. Neben Veröffentlichungen in Zeitschriften und auf Konferenzen wurde die entwickelte 'Anwendungsklassifizierung' für eine Berücksichtigung bei der internationalen Normung im internationalen Dokument 'IEC SC65C WG 17 – Wireless Coexistence' am 23.06.2010 vorgestellt. Außerdem wurden die erarbeiteten 'Datenblattangaben zum Koexistenzmanagement' im Oktober 2010 in einem weiteren internationalen Dokument eingearbeitet: IEC Draft Technical Specification IEC/DTS 62657 "Industrial communication networks – Wireless communication network and communication profiles – Wireless Coexistence".

Zur weiteren Verstetigung der erzielten Forschungsergebnisse soll das entwickelte Testsystem als Industriestandard etabliert werden. Dazu ist im März 2012 vom Fachausschuss FA5.21 „Funkgestützte Kommunikation“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) ein Aufruf zur Mitarbeit bei dem Thema 'Messtechnische Performance-Bewertung von Funklösungen für industrielle Automatisierungsanwendungen' erfolgt. Die Ergebnisse sollen in Form eines Richtlinienblattes zur VDI/VDE-Richtlinie 2185 veröffentlicht werden. Es richtet sich an Hersteller industrieller Funklösungen, an Planer industrieller Funkanwendungen, an Betreiber industrieller Funkanwendungen, an Funktechnologielieferanten sowie an Normungsgremien für die industrielle Kommunikation bzw. die Funkkommunikation. Die Veröffentlichung des Gründrucks soll 2013 zur Hannover-Messe Industrie erscheinen.

Das Forschungsvorhaben wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Fachausschuss FA5.21 „Funkgestützte Kommunikation“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) und dem ZVEI- Arbeitskreis 'Wireless Automation' durchgeführt.

9 Anhang

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] * "Testing coexistence of different RTE protocols in the same network", Paolo Ferrari, Alessandra Flammini, Daniele Marioli, Stefano Rinaldi, Andrea Taroni, (University of Brescia, Italien)
- [2] A. Willig, K. Matheus, A. Wolisz, Wireless Technology in Industrial Networks, Proc. of the IEEE, vol. 93, no. 6, June 2005
- [3] Amirhossein Alimohammad, Saeed Fouladi Fard, Bruce F. Cockburn, Christian Schlegel: A Compact Fading Channel Simulator Using Timing-Driven Resource Sharing, 2007 IEEE, Application -specific Systems, Architectures and Processors, 2007, ASAP, IEEE International Conf., pp. 154-159
- [4] Bastert, M.; Nußbaum, K.; Steiner, B.; Altmaier, H.; Meier, U.: Reproduzierbare Vermessung von Funksystemen in zeit- und frequenzselektiven Fading-Umgebungen; 10. Wireless Technologies Kongress 2008; Bochum; Status: angenommen
- [5] Dassatti-A; Masera-G; Nicola-M; Concil-A; Poloni-A: High performance channel model hardware emulator for 802.11n, IEEE International Conference on Field Programmable Technology, 2005, pp. 303-304
- [6] FITS - Einflussgrößen zur Definition von Anwendungsklassen
- [7] Gozálvez-J; Pons-J; Dunlop-J; Irvine-J: Real-time channel emulation for mobile communication test beds, IEEE Wireless Communications, Band 14, 2007, No. 3, pp. 54-60
- [8] Hamid Eslami, Ahmed M. Eltawil: A Scalable Wireless Channel Emulator for Broadband MIMO Systems; IEEE International Conference on Communications, ICC '07, 2007, pp. 2592-2597
- [9] ifak e.V. Magdeburg, "Definition of Application Profiles.", Bericht im Projekt "Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS)", Entwurf 2010
- [10] ifak e.V. Magdeburg, "Einflussgrößen zur Definition von Anwendungsklassen.", Bericht im Projekt "Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS)", 18.04.2010
- [11] ifak e.V. Magdeburg, "Spezifikation von Testsystem und Testmethodik.", Bericht im Projekt "Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS)", Entwurf 2011
- [12] ifak e.V. Magdeburg, Institut Industrial IT Lemgo, "Analyse der Erprobungsmessungen.", Bericht im Projekt "Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS)", Entwurf 2011
- [13] ifak e.V. Magdeburg, Institut Industrial IT Lemgo, "Analyse der Validierungsmessungen.", Bericht im Projekt "Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS)", Entwurf 2011
- [14] Institut Industrial IT Lemgo, "Auswertung der HF Messungen.", Bericht im Projekt "Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS)", Entwurf 2010
- [15] Institut Industrial IT Lemgo, "Modellierung der Ausbreitungsbedingungen.", Bericht im Projekt "Entwicklung von Standardtests zur einheitlichen Bewertung industrieller Funklösungen (FITS)", Entwurf 2011
- [16] ISA SP100.11a, Draft Standard, 21.12.2007

- [17] Jeng-Kuang Hwang, Kuei-Horng Lin, Jeng-Da Li, Juinn-Horng Deng: Fast FPGA Prototyping of a Multipath Fading Channel Emulator via High-Level Design, Communications and Information Technologies, 2007, ISCIT '07, International Symposium, pp. 168-171
- [18] Kaleem Ahmad, Uwe Meier: Coexistence Optimization of Wireless PAN Automation Systems, 7th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - WFCS 2008, Dresden, Germany, May 2008.
- [19] Körber, H.-J.; Wattar, H.; Scholl, G.: Modular wireless Real-Time Sensor/Aktor Network for Factory Automation Applications; IEEE Transaction on Industrial Informatics, Volume 3, Nr. 2, May 2007
- [20] L. Rauchhaupt, "Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik" In: at-Automatisierungstechnik 53 (2005) Nr. 4-5, S. 197ff
- [21] L. Rauchhaupt, E. Hintze, A. Gnad: Über die Bewertung der Zuverlässigkeit industrieller Funklösungen, Automatisierungstechnische Praxis, atp 49, 2007, Heft 3 (38 - 47), Heft 4 (50 - 57)
- [22] M. Höing, K. Ahmad, U. Meier: Koexistenzmessungen – von der Theorie zu Standardisierungsbetrachtungen, dargestellt anhand von Messungen an einem industriellen Bluetooth-System; Wireless Automation 2008, 28.02. - 29.02.2008, Berlin
- [23] M. Höing, K. Helmig, U. Meier: Bluetooth ungestört - Erprobungstests der Bluetooth-Technologie am Beispiel eines industriellen Sensor-Aktor-Systems; Wireless Automation 2007, 28.02. - 01.03.2007, Magdeburg
- [24] Olmos-J-J; Gelonch-A; Casadevall-F-J; Fermenias-G.: Design and implementation of a wide-band real-time mobile channel emulator, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Band 48, 1999, No. 3, pp. 746-764
- [25] U. Meier, S. Witte, K. Helmig, M. Höing, M. Schnücker, H. Krause: Performance Evaluation and Prediction of a Bluetooth Based Real-Time Sensor Actuator System in Harsh Industrial Environments; 12th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Patras, Greece, Sep 2007
- [26] Verein Deutscher Ingenieure, Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik (Radio based communication in industrial automation), VDI/VDE Richtlinie 2185, September 2007
- [27] Wilkinson-T-A :Channel modelling and link simulation studies for the DECT test bed program, Sixth International Conference on Mobile Radio and Personal Communications, Band No.351, 1991, pp. 293-299
- [28] www.azimuthsystems.com: ACE™ 400NB MIMO Channel Emulator, Azimuth, 2008

9.2 Abkürzungsverzeichnis

VSG	Vector Signal Generator
SUT	System Under Test
DUT	Device Under Test

9.3 Softwaredokumentation

Beachten Sie hierzu bitte auch die FKM-Softwarerichtlinie.

Die Software an sich wird über unser Internet Projektcenter ProMeta bereitgestellt.

9.4 Veröffentlichungen

Tabelle 43: Veröffentlichungen im Rahmen des FITS Projekt

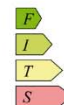
Maßnahme	Termin
Information der Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	03.11.2009
Vorstellung und Diskussion der Projektes im GMA Fachausschuss FA5.21 „Funkgestützte Kommunikation“	07.10.2009
Vorstellung und Diskussion der Projektes im Arbeitskreis „Wireless in der Automation“ ZVEI	15.09.2009
Entwicklung eines automatisierten Messsystems für zeitlich schnellveränderliche Funkkanäle mit PC-basierter Steuerung im Rahmen eines Studentenaustauschprogramms der Hochschule Ostwestfalen-Lippe mit Singapur. Der entstandene Demonstrationsaufbau soll in Praktika eingesetzt werden.	24.01.2010
Vorstellung des Projektes im Rahmen der Eröffnung des Entwicklungslabors und Testfelds für Ortung, Navigation und Kommunikation in Verkehr und Logistik Magdeburg am 10. März 2010	10.03.2010
Information der Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	06.05.2010
Vorstellung der Anwendungsklassifizierung in IEC SC65C WG 17 „Wireless Coexistence“ zur Berücksichtigung bei der internationalen Normung	23.06.2010
Veröffentlichung eines Artikels zu den im Rahmen des Testsystem verwendeten echtzeitfähigen Kanalemulator in der Zeitschrift Elektronik zur Hannover Messe	Ausgabe 07/2010
Vorstellung der Datenblattangaben bei ZVEI AK „Wireless in der Automation“	20.09.2010
Kongressbeitrag Wireless Technologies 2010, „Echtzeitfähige Vermessung und Emulation industrieller Funkkanäle“	22.09.2010
Statusvorstellung im GMA FA5.21	28.09.2010
Information der Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	01.12.2010
Veröffentlichung des FITS-Konzepts auf der Konferenz ,16. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): A Unified Approach for the Assessment of Industrial Wireless Solutions	05.-09.09. 2011
Abschlussveranstaltung „FITS“	25.01. 2012
Real-Time Characterization of Fast-Varying Industrial Wireless Channels. Eingereicht bei der Konferenz '9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - WFCS 2012'	Mai 2012
FITS – Methodik und Ergebnisse. Einreichen bei Zeitschrift atp	Frühjahr 2012
FITS – Methodik und Ergebnisse. Einreichen bei 17. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)	September 2012
Erstellung eines Richtlinienblattes: Performance-Bewertung industrieller Funklösungen – Veröffentlichung Gründruck	Ende 2012

9.5 Liste der FITS Dokumente

Tabelle 44: Liste der FITS Dokumente

AP	Name des Dokuments
1 – Klassifizierung von Anwendungsbereichen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Einflussgrößen zur Definition von Anwendungsklassen 2. Definition of Application Profiles
2 – Analyse der relevanten Übertragungsbedingungen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spezifikation der HF Messungen 2. Messergebnisse HF-Messungen
3 – Definition von Standardtestfällen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definition of Coexistence Data Sheet Parameters 2. Definition und Standardtestfällen basierend auf Kenngrößen
4 – Modellierung HF-Übertragungsbedingungen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Parameterextraktion Kanalemulator nach der „kleinste Quadrate“-Methode 2. Dokument über MIMO Messungen 3. Modellierung der Funkausbreitungsbedingungen
5 – Spezifikation von Testsystem und Testmethodik	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spezifikation von Testmethodik und Testsystem
6 – Demonstrator	<ol style="list-style-type: none"> 1. Specification of FITS project manager demonstrator 2. Documentation of FITS project manager demonstrator
7 – Validierung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spezifikation der Validierungsmessungen 2. Ergebnisse der Validierungsmessungen 3. Analyse der Validierungsmessungen
8 – Durchführung von Erprobungsmessungen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spezifikation der Erprobungsmessungen 2. Ergebnisse der Erprobungsmessungen 3. Analyse der Erprobungsmessungen
9 - Abschlussbericht	Gliederung des Abschlussberichts: <ol style="list-style-type: none"> 2. Einleitung 3. Anwendungsprofile für die industrielle Funkkommunikation 4. Standardtestfälle 5. Modellierung der Funkausbreitungsbedingungen in der Industrie 6. Testsystem für Standardtests 7. Exemplarische Testergebnisse 8. Zusammenfassung und Ausblick
Sonstige Dokumente	<ol style="list-style-type: none"> 1. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft 2. Zwischenbericht 2009

9.6 FITS Zertifikatformular



Standard Performance Test Summary

Manufacturer: HiWinix 113
System under test: WiZigBlue 113
Date and time of test: January 2012
Test group: Machine
Test case: Standard



Transmission time

Mode value [ms]: 35,7
 Percentile P95 value [ms]: 45,9

Update time

Mean value [ms]: 100,4
 Standard deviation value [ms]: 16,9

Packet loss rate

Total PLR: 0,48%

Availability

Total A: 99,52%

Histograms

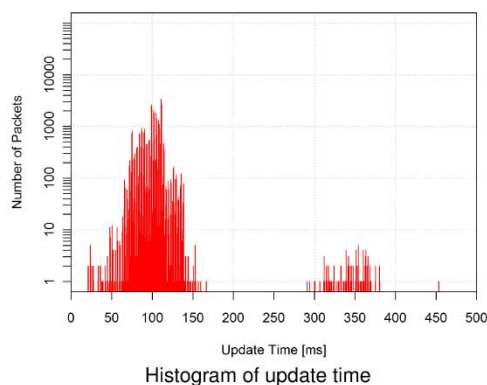
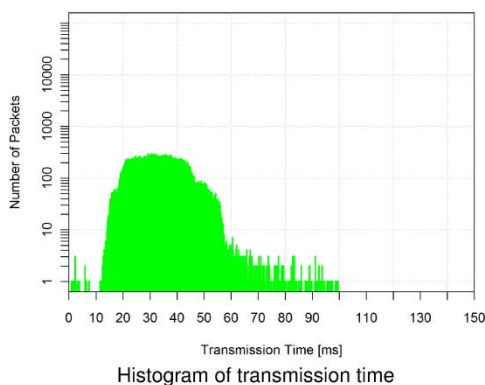
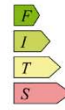


Abbildung 60: FITS-Zertifikat für den Testfall „Maschine – Standard“



Standard Performance Test Summary

Manufacturer: HiWinix 224
System under test: WiZigBlue 224
Date and time of test: January 2012
Test group: Factory hall
Test case: Interferer

Performance class: 

Transmission time

Mode value [ms]: 0,3
Percentile P95 value [ms]: 2,5

Update time

Mean value [ms]: 33
Standard deviation value [ms]: 6

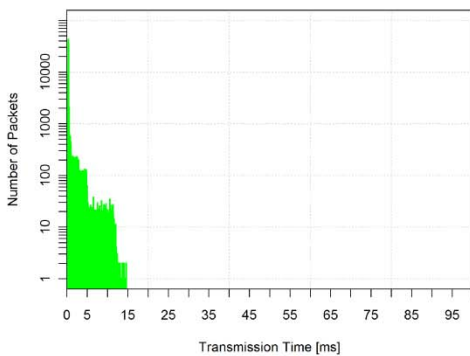
Packet loss rate

Total PLR: 2,08%

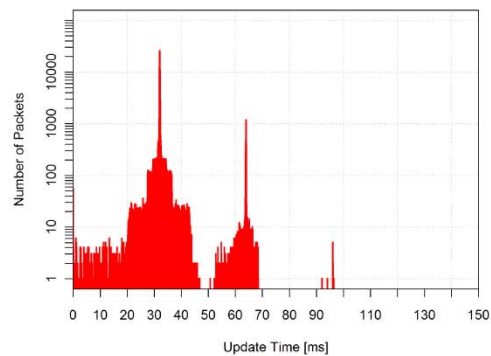
Availability

Total A: 97,92%

Histograms

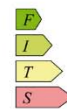


Histogram of transmission time



Histogram of update time

Abbildung 61: FITS-Zertifikat für den Testfall „Fabrikhalle – Interferer“



Standard Performance Test Summary

Manufacturer: HiWinix 322
System under test: WiZigBlue 322
Date and time of test: January 2012
Test group: Process plant
Test case: Outdoor standard

Performance class:

**Response time**

Mode value [ms]: 45,4
 Percentile P95 value [ms]: 46,2

Packet loss rate

Total PLR: 0,08%

Availability

Total A: 99,92%

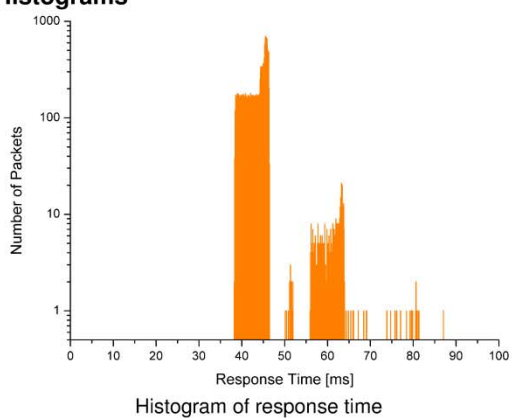
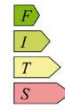
Histograms

Abbildung 62: FITS-Zertifikat für den Testfall „Prozessanlage – Outdoor Standard“



Standard Performance Test Summary

Manufacturer: HiWinix 4114
System under test: WiZigBlue 4114
Date and time of test: January 2012
Test group: Special
Test case: Standard

Performance class:

			A	100,00%
--	--	--	---	---------

Transmission time

Mode value [ms]: 0,36
Percentile P95 value [ms]: 0,46

Update time

Mean value [ms]: 10
Standard deviation value [ms]: 0,18

Packet loss rate

Total PLR: 0%

Availability

Total A: 100%

Histograms

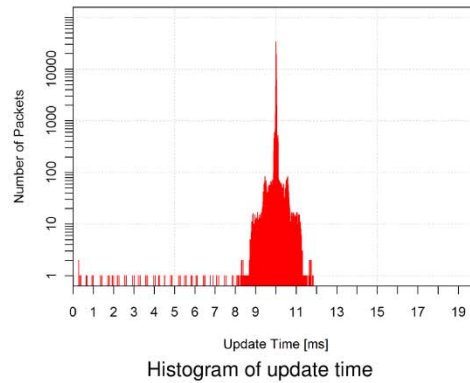
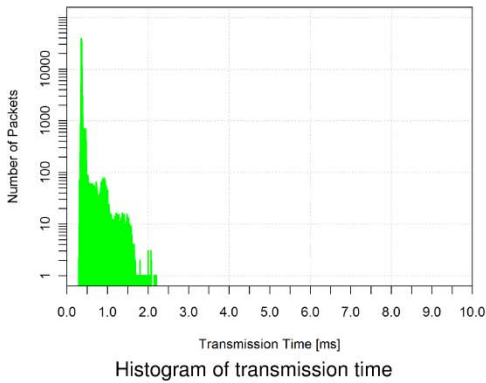


Abbildung 63: FITS-Zertifikat für den Testfall „Spezial – Standard“