

Fehlertolerante Industrielle Wireless-Mesh-Network-Infrastruktur *

Georg Lukas

Institut für Verteilte Systeme (IVS)
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
glukas@ovgu.de

Abstract: Drahtlose Kommunikation spielt eine immer größere Rolle in industriellen Anwendungen. Gleichzeitig erfordern es diese Anwendungen, dass das Netzwerk Ende-zu-Ende-Dienstgüte garantieren und umsetzen kann. Drahtlose vermaschte Netzwerke (Wireless Mesh Networks, WMNs) sind hervorragend für die Flexibilitätsanforderungen gerüstet, bieten aber keine inhärente Dienstgüte. In der Doktorarbeit werden Methoden der Fehlertoleranz angewendet, um eine für industrielle Anwendungen geeignete WMN-Infrastruktur mit Dienstgüteggarantien bereitzustellen. Die Infrastruktur wird aus den industriellen Anforderungen entwickelt und umgesetzt. Ihre Praxistauglichkeit belegt sie durch eine Evaluierung in einem Tele-Robotik-Szenario in einer realen Testumgebung.

1 Kontext und Motivation

Die Vernetzung industrieller Anlagen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Besonders im Zuge der steigenden Anforderungen an Flexibilität und Effizienz soll vermehrt drahtlose Kommunikation zum Einsatz kommen. Die industriellen Anwendungen stellen allerdings hohe Anforderungen an das Kommunikationssystem. Für Aufgaben wie die Steuerung einer Anlage oder die manchmal nötige Fernsteuerung eines fahrerlosen Transportsystems (FTS) müssen für die Ende-zu-Ende-Übertragung Garantien bezüglich Latenz, Paketverlustrate und verfügbarer Bandbreite (*Dienstgüte* bzw. *QoS*) gegeben werden.

Um den genauen Dienstgütebedarf zu ermitteln, wurde eine Analyse der potentiellen Anwendungsklassen mit hohen Ansprüchen – Steuerung/Regelung und videobasierte Tele-Operation mobiler Roboter – durchgeführt. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Regelung stationärer Maschinen sind Latenzzeiten von 10 ms (Round-Trip-Time) zu garantieren. Für die Tele-Operation sind Latenzen bis zu 200 ms akzeptabel, allerdings stellt diese Anwendung zusätzlich hohe Durchsatzanforderungen (einige MBit/s) an das Medium und benötigt eine unterbrechungsfreie Verbindung selbst dann, wenn sich die Kommunikationsteilnehmer durch die Anlage bewegen (spezifiziert als Obergrenze für aufeinander folgende Paketverluste, *Omission Degree*).

*Englischer Titel der Dissertation: "Fault-tolerant Industrial Wireless Mesh Network Infrastructure"[Luk12]

Die bisher existierenden Kommunikationssysteme bieten entweder nicht die notwendige Durchsatzkapazität (Wireless Sensor Networks, WSN, z.B. WirelessHART[Wir10]) oder nicht die Möglichkeit, sich ohne Kommunikationsunterbrechung im gesamten Anlagenbereich zu bewegen (Infrastruktur-WLAN, z.B. *flex*WARE[SJB09]). Eine Kombination dieser Funkverfahren ist zwar prinzipiell denkbar, erschwert aber einerseits die Administration (zwei getrennte Netzwerke müssen gewartet und Übergangspunkte zwischen ihnen aufgebaut werden), andererseits kollidieren teilweise die genutzten Frequenzbänder (2.4 GHz ISM), was zu einer gegenseitigen Beeinträchtigung der Netzwerke führen kann.

Eine gemeinsame drahtlose Kommunikationsinfrastruktur, die Echtzeitanwendungen mit hohen Durchsätzen ermöglicht, würde nicht nur den administrativen Aufwand senken, sondern auch neue Anwendungen im Industrielltag ermöglichen, wie z.B. auf Sensorfusion basierte Kooperation mobiler Roboter und Augmented Reality.

2 Herausforderungen

Industrielle Anwendungen benötigen Garantien über den Durchsatz, die Latenz und die zulässigen Paketverluste für den gesamten Pfad vom Sender zum Empfänger (Ende-zu-Ende-Dienstgüte). Gleichzeitig können sich Netzwerkteilnehmer bewegen und es ist möglich, dass Komponenten ausfallen und dadurch die Erfüllung der Garantien gefährden.

Die Bereitstellung solcher Garantien für drahtlose Kommunikation ist besonders herausfordernd, da sowohl das Medium als auch die (mobilen) Teilnehmer ständiger Veränderung unterworfen sind. Solche Veränderungen können dadurch verursacht werden, dass sperrige Objekte im Lagerbereich einer Halle abgestellt werden, oder dass bei einer Rekonfiguration des Produktionsprozesses andere Anlagen zum Einsatz kommen, die die Ausbreitung der Funksignale beeinflussen. Gleichzeitig sorgt die Mobilität von Kommunikationsteilnehmern dafür, dass ihre Signalstärke sich verändert (was häufig zu einem Wechsel der Modulation und der Datenrate führt), oder eine bestehende Funkverbindung gänzlich abreißen kann.

Diese Veränderungen sorgen dafür, dass die für die Erfüllung der Anforderungen zur Verfügung stehenden Ressourcen ständig schwanken. Werden dann mehr Daten in das Netz gesendet als es übertragen kann, kommt es zu einer Überlast-Situation, Paketverluste und Latenzen steigen an und es können keine Garantien mehr gegeben werden. Darüber hinaus muss die Infrastruktur auch mit auftretenden Fehlern umgehen können, und selbst beim Ausfall einzelner Knoten noch einen zuverlässigen Dienst bereitstellen.

Gleichzeitig soll für die Entwickler industrieller Applikationen die Komplexität der Kommunikationsinfrastruktur derart abstrahiert werden, dass eine Entwicklung auch ohne ein Verständnis der komplexen Vorgänge bei der Signalausbreitung und Medienzuteilung möglich ist.

3 Konzept

Im Rahmen der Doktorarbeit wurden Methoden der Fehlertoleranz angewendet, um eine industrielle Kommunikationsinfrastruktur auf Basis drahtloser vermaschter Netzwerke bereitzustellen. Hierzu wurde zunächst ein Fehlermodell entwickelt, welches alle auftretenden Einflüsse auf die Ende-zu-Ende-Dienstgüte als Fehler klassifiziert. Um Fehler zu erkennen und in angemessener Zeit darauf reagieren zu können, wurden *schichtübergreifende Monitoring-Mechanismen* entwickelt, deren Messdaten aggregiert und zentral in *QoS-Modellen* abgespeichert werden. Diese Modelle werden herangezogen, um auf Basis der Anwendungsanforderungen zu entscheiden, welche Datenströme zugelassen werden (*Admission*) und so eine Überlastung des Netzes zu vermeiden. Die entwickelten Komponenten arbeiten in einem Regelkreis (Abbildung 1), der sich ständig an den Ist-Zustand des Netzwerks anpasst. Gleichzeitig sorgen proaktive Elemente wie lokales Rerouting dafür, dass Fehlerzustände soweit möglich vermieden werden.

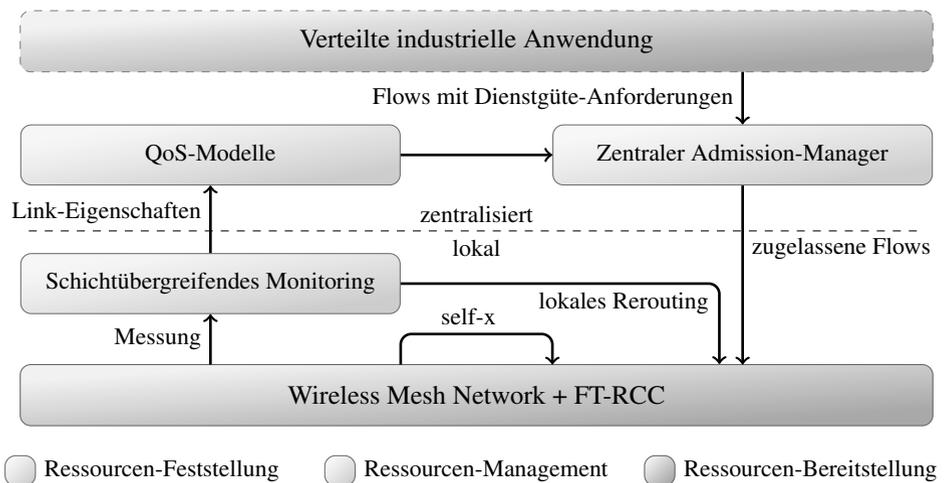


Abbildung 1: Fehlertolerante Industrielle WMN-Infrastruktur

3.1 Zugrundegelegte Technologien

Als Grundlage der Kommunikationsinfrastruktur wurden drahtlose vermaschte Netzwerke (Wireless Mesh Networks, WMN [AWW05]) auf Basis des WLAN-Standards ausgewählt. Sie bestehen aus stationären *Mesh-Routern*, die den Kern der Infrastruktur bilden, und potentiell mobilen *Mesh-Clients*, auf denen die Anwendungen laufen. WMNs sind durch ihre *self-x*-Eigenschaften (Selbst-Organisation und -Heilung) sehr gut geeignet, eine flexible und der hohen Dynamik gerecht werdende Infrastruktur aufzubauen. Hinzu kommt die hohe Durchsatzkapazität und weite Verfügbarkeit der zugrundeliegenden WLAN-Hardware.

Um hinreichende Abdeckung einer Anlage durch Funksignale und redundant verfügbare Verbindungen zwischen Mesh-Routern zu gewährleisten, wird eine nach „*Fault-tolerant Radio Coverage and Connectivity in WMNs*“ (FT-RCC, [IN12]) vorausgeplante Mesh-Router-Infrastruktur vorausgesetzt. Auf diese Weise kann der Fokus der Arbeit auf die nicht minder schweren Herausforderungen der Bereitstellung von Ende-zu-Ende-Dienstgüte gelegt werden.

3.2 Fehlertoleranz-Ansatz

Die durch FT-RCC bereitgestellte physikalische Infrastruktur deckt bereits Ausfälle von Mesh-Knoten und inadäquate Abdeckung durch Funksignale ab. Ausgehend davon wurden die möglichen Auslöser für Verletzungen der Dienstgütegarantien in einem eigenen Fehlermodell zusammengefasst. Diese Auslöser leiten sich aus der Umgebungs- und Teilnehmerdynamik im Netzwerk ab. Hier wurden vier mögliche Ursachen herausgearbeitet:

1. *Verringerung der Link-Übertragungskapazität* – die Kapazität einer Verbindung besagt, wie schnell Daten zwischen zwei Mesh-Knoten übertragen werden können. Sie hängt von der WLAN-Senderate und den nötigen Wiederholungsversuchen ab und variiert je nach Entfernung, Anwesenheit von Hindernissen und Ausbreitungseffekten.
2. *Verschlechterung der Link-Dienstgüteeigenschaften* – die nichtfunktionalen Eigenschaften eines Links (Latenz, Paketverlustrate, omission degree) sind für die darüber laufenden Übertragungen relevant und hängen von den selben Einflussfaktoren ab wie die Link-Kapazität.
3. *Ungültige Links* – wenn ein mobiler Teilnehmer sich von einem Knoten entfernt oder ein Knoten ausfällt, werden logische Verbindungen im WMN abgerissen. Es dauert jedoch einige Zeit (in gängigen WMNs mehr als 10 s), bis der Ausfall erkannt und der Link nicht mehr verwendet wird. In der Zwischenzeit ist die Kommunikation unterbrochen.
4. *Überlastung des Mediums* – wenn mehr gleichzeitige Übertragungen auf dem Medium stattfinden, als die summierte Kapazität aller Links zulässt, müssen Datenpakete verworfen werden oder länger auf ihre Übertragung warten. Daher muss eine Überlastung um jeden Preis verhindert werden. Dafür wird selbst die kontrollierte Deaktivierung von (niedriger priorisierten) Flows in Kauf genommen.

Ausgehend von diesem Fehlermodell wurden die Komponenten des Regelkreises aufgebaut. Es wurden Monitoring-Module für Link-Kapazität, Link-Dienstgüteeigenschaften und Link-Ausfälle entwickelt, und ein zentraler Admission-Manager eingesetzt, der anhand der gemessenen Daten die Anwendungsgarantien kontrolliert und eine Überlastung verhindert. Der zweite wichtige Fehlertoleranz-Baustein ist eine Kapazitätsreserve, die der Admission-Manager für lokale Reparaturmaßnahmen zurückhält, statt sie an Anwendungen zu vergeben. Diese Reserve kompensiert zum einen die Zeit zwischen dem Auftreten und der Erkennung eines Fehlers, zum anderen ermöglicht sie, dass ein Knoten lokal Maßnahmen trifft, ohne diese vorher mit dem zentralen Manager koordinieren zu müssen.

3.3 Verteiltes Monitoring

Alle Mesh-Knoten (einschließlich der mobilen Teilnehmer) überwachen stetig ihre Links und melden deren Zustand an einen zentralen Knoten, der alle Informationen zu Dienstgüte-Modellen zusammenfasst. Um möglichst korrekte und aktuelle Daten zu erhalten, wurden dabei schichtübergreifende Ansätze entwickelt, die Informationen aus der MAC-Schicht, wie die WLAN-Senderate, die Häufigkeit von Wiederholungen und ausbleibende Bestätigungspakete (ACKs), ermitteln und für die Modellbildung nutzen.

Um Informationen über die Latenzen und die Link-Auslastung zu erhalten, wird eine Cross-Layer-Version der ETT-Metrik (*Estimated Transmission Time*) eingesetzt. Die gewonnenen Daten werden als Linkkosten durch das WMN-Routingprotokoll weitergegeben und für die Berechnung der Gesamtlast genutzt [LLN11]. Für die Paketverlustmessung kommt ein verteiltes Verfahren zum Einsatz, bei dem jeder Knoten die ankommenden Pakete von allen seinen Nachbarn zählt und periodisch mit den jeweiligen Sendern abgleicht.

Besondere Aufmerksamkeit verdient jedoch die beschleunigte Erkennung von Link-Ausfällen [LLN10]. Entsprechend dem Empfang von ACK-Paketen wird der Zustand jedes Links permanent durch ein Link-Fehler-Modell als *funktionsfähig* oder *ausgefallen* eingestuft. Wird ein Linkausfall erkannt, werden alle weiteren Datenpakete über eine alternative Verbindung gesendet und der Ausfall dem zentralen Manager bekannt gegeben. Diese Vorgehensweise erlaubt es, die Anzahl verlorener Pakete um mehrere Größenordnungen auf maximal 4 Verluste pro ausgefallenem Link zu reduzieren.

3.4 QoS-Modelle

Die Aufgabe der QoS-Modelle ist es, die Monitoring-Informationen zu aggregieren und über eine gemeinsame Schnittstelle bereitzustellen. Für jedes im Einsatzszenario relevante QoS-Attribut gibt es dabei ein separates Modell. Dieser Ansatz erlaubt es, das Gesamtsystem im Funktionsumfang an die Anwendungsanforderungen anzupassen oder später durch weitere QoS-Attribute zu ergänzen.

Eine Sonderstellung nimmt das Modell für die Medienauslastung an: da die Kapazität des Mediums begrenzt ist, wird mit seiner Hilfe entschieden, ob das Medium durch eine neue Verbindung (und die durch diese erzeugte Last T) eventuell überlastet werden könnte. Damit ist dieses Modell im Gegensatz zu jenen für Latenz und Paketverluste immer erforderlich.

Die anderen Modelle müssen Informationen darüber bereitstellen, ob eine bestimmte Ende-zu-Ende-Anforderung an das jeweilige Attribut erfüllt werden kann oder nicht. Dazu müssen aus den vorgehaltenen Link-Eigenschaften die jeweiligen Ende-zu-Ende-Eigenschaften abgeleitet werden. Um diese Berechnung zu ermöglichen, enthält jedes Modell auch die nötigen Rechenvorschriften (Tabelle 1).

Tabelle 1: Ende-zu-Ende Rechenvorschriften für unterschiedliche Dienstgüteattribute

| <i>Link-Eigenschaft</i> | <i>Ende-zu-Ende</i> | <i>Rechenvorschrift</i> |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Link-Kosten c | Auslastung U | $U = T \sum c_i$ |
| Latenz l | Latenz L | $L = \sum l_i$ |
| Paketverlust p | Zustellwahrscheinlichkeit D | $D = \prod (1 - p_i)$ |

3.5 Zentraler Admission-Manager

Der zentrale Admission-Manager erfüllt die wichtigste Aufgabe bei der Bereitstellung der Dienstgüte. Unter Verwendung der QoS-Modelle muss er für jeden Anwendungsdatenstrom (*Flow*) entscheiden, ob dieser unter den momentanen Netzwerkbedingungen zugelassen werden kann. Dabei darf der Flow das Netzwerk nicht überlasten und die von ihm geforderten Ende-zu-Ende-Eigenschaften müssen gewährleistet sein. Hier kommt auch die Fehlertoleranz zum Tragen: diese Bedingungen müssen auch dann erfüllt werden, wenn sich die Netzwerksituation durch Mobilität oder Knotenausfall verändert.

Obwohl es möglich ist, eine korrekte verteilte Zugangskontrolle zu realisieren, ist der Kommunikationsaufwand dafür immens groß. Für die Vernetzung einer Industrieanlage ist eine zentrale Lösung (mit entsprechend redundanter Absicherung) besser geeignet, da der Gesamtaufwand geringer ist, und der zentrale Knoten durch seine Lage in der Topologie gut von allen Teilnehmern erreicht werden kann.

Bei der Berechnung der Medienauslastung werden alle von den existierenden Flows verwendeten Links und die dort jeweils erzeugte Auslastung aufsummiert. Dazu kommt noch der für den Betrieb des Netzwerks nötige Datenverkehr (Hello-Nachrichten, Monitoring, Flow-Reservierungen). Soll ein neuer Datenstrom zugelassen werden, wird die durch ihn voraussichtlich erzeugte Auslastung dazuaddiert. Übersteigt die Summe den für die Reserve vorgesehenen Schwellwert, muss der Datenstrom abgelehnt werden.

Kann das Netzwerk einen angeforderten Flow aufnehmen, werden zusätzlich seine QoS-Anforderung mittels der Modelle geprüft. Auch hierbei wird eine Reserve für den Fall einer Verschlechterung vorgehalten. Nur wenn alle Überprüfungen positiv verlaufen, wird der Flow genehmigt und die Anwendung darf Daten versenden.

Verschlechtert sich der Zustand des Netzwerks, wird das als *error state* betrachtet. Dabei treffen die beteiligten Knoten zunächst einmal lokal Maßnahmen, um den Fehler zu kompensieren – so wird z.B. ein alternativer Pfad im Netzwerk genutzt. Gleichzeitig wird die Änderung auch in die QoS-Modelle übertragen, so dass der Admission-Manager zentral Maßnahmen treffen kann. Dazu wird zunächst geprüft, ob die QoS-Anforderungen nach wie vor erfüllt werden und ob noch keine Überlast herrscht. Sind die Bedingungen noch ausreichend, wird der *error state* aufgehoben, ansonsten wird eine Fail-Safe-Maßnahme eingeleitet und der betroffene Datenstrom kontrolliert beendet. Durch die Festlegung des Reserveumfangs kann dabei abgewogen werden, wie viel Dynamik das Netzwerk kompensieren können soll, ohne einen Fail-Safe-Zustand einzuleiten.

3.6 Anwendungsintegration

Gegenüber den Anwendungen wird vom zentralen Admission-Manager eine Schnittstelle definiert, über die Flows reserviert werden können. Ein Flow ist dabei eine Ende-zu-Ende-Verbindung, für die eine Anwendung Dienstgüteeanforderungen definiert, die vom Netzwerk erfüllt werden müssen. Jeder Flow wird definiert über Sender, Empfänger, die generierte Netzwerklast und seine Dienstgüteeanforderungen. Dabei muss die Infrastruktur durch Monitoring erzeugte QoS-Modelle für alle Dienstgüteeattribute bereithalten, die durch Anwendungen angefordert werden können. In der vorliegenden Umsetzung wurden die beiden wichtigsten Attribute Paketverluste und Latenz behandelt, weitere sind jedoch durch die flexibel ausgestaltete Attributsprache[SL09] möglich.

4 Umsetzung und Evaluierung

Die entwickelten Konzepte wurden als Module für das am Lehrstuhl entwickelte Routing-Protokoll AWDS (Ad-hoc Wireless Distribution System) entwickelt. Die Umsetzung erfolgte in C++ und kann auf Linux-Systemen sowie im Netzwerk-Simulator ns-2 eingesetzt werden. Eine für Embedded-Linux abgestimmte Version wird zur Zeit für die Integration in die WLAN-Router eines Herstellers für Industriekommunikation vorbereitet.

Um die praktische Einsetzbarkeit der entwickelten Infrastruktur zu belegen, wurden zunächst alle Komponenten individuell evaluiert. Die Evaluierung erfolgte soweit möglich in einer realen Testumgebung, um Verfälschungen durch ungenaue Simulationsmodelle auszuschließen.

Im Anschluss wurde das Gesamtsystem in einem Praxistest auf seine Vollständigkeit und Anwendbarkeit für industrielle Anwendungen getestet. Dabei wurde auch die Notwendigkeit der einzelnen Komponenten geprüft. Hierzu wurde die Fernsteuerung eines mobilen Roboters aus einer Leitzentrale als Anwendung herangezogen. Gleichzeitig sorgten bis zu vier Hintergrunddatenströme für eine Auslastung des Mediums.

Die Fernsteuerung wurde als Anwendung ausgewählt, weil sie neben einer Obergrenze für Latenzen auch Mobilität und hohe Kapazitätsanforderungen für die Videoübertragung mitbringt. Ferner kann man daran direkt sehen, wenn die Latenzanforderungen verletzt werden und der Roboter nicht mehr unmittelbar auf Steuerbefehle reagiert. Die genauen Anforderungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Flow-Parameter bei der Evaluierung

| <i>Flow</i> | <i>Prio.</i> | <i>Last*</i> | <i>Attribute</i> |
|--------------------------|--------------|--------------|--|
| Fernsteuerung (control) | 8 | 16 | $RTT \leq 200 \text{ ms}, OD \leq 5$ |
| Roboter-Video (video) | 8 | 6400 | $L \leq 100 \text{ ms}, p_{loss} \leq 5\%$ |
| 4x Hintergrunddaten (bg) | 1 | 3000 | – |

* Lastangabe in Kbit/s

RTT = Round-Trip Time, OD = Omission Degree, L = Latenz

4.1 Eignung für industrielle Anwendungen

Um die Funktionsfähigkeit der Infrastruktur zu zeigen, wurde ein Netzwerk aus neun stationären Mesh-Routern in einem Teil des Fakultätgebäudes aufgebaut. In diesem Netzwerk konnte sich der mobile Roboter frei bewegen. Entsprechend der Mobilität wurde eine Kapazitätsreserve von 30% vorgesehen. Für den Versuch startete der Roboter in der Nähe der Leitzentrale, entfernte sich zunächst über einen Flur, um dann zurück zu kommen und sich über einen anderen Flur wieder zu entfernen. Die Erwartung dabei war, dass bei steigender Entfernung sich die durch die Videoübertragung erzeugte Netz-Auslastung erhöht. Um die Anforderungen des Videostroms weiter zu erfüllen, würden nach und nach Hintergrund-Datenströme beendet werden. Wenn der Roboter sich der Leitzentrale nähert, sollten durch freiwerdende Kapazität wieder zusätzliche Datenströme zugelassen werden. Gleichzeitig sollte eine Erfassung des Steuerkanals belegen, dass die Anforderungen an Latenz und Omission Degree selbst bei den auftretenden Linkausfällen nicht verletzt werden.

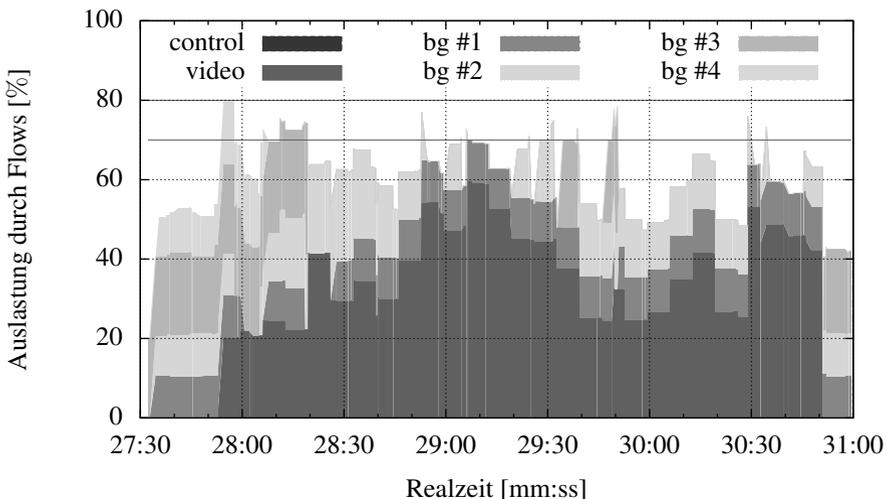


Abbildung 2: Vollständige Infrastruktur: Flows & Auslastung

In Abbildung 2 ist die durch den Admission-Manager festgestellte Auslastung des Netzwerks als Summe der einzelnen Datenströme abgebildet. Bei 28:50 und 30:28 ist der Anstieg der Auslastung durch die Videoübertragung deutlich zu sehen, stellenweise werden alle bis auf einen Hintergrundtransfers angehalten, was den Erwartungen entspricht. Abbildung 3 zeigt ein Histogramm der Ende-zu-Ende-Latenzen des Steuerkanals. Es ist deutlich zu erkennen, dass die meisten Nachrichten in weniger als 1 ms übertragen wurden, die höchste Latenz liegt unterhalb von 200 ms. Diese Messungen bestätigen, dass die Komponenten der Infrastruktur funktionieren und dass sie im Zusammenspiel die Anforderungen der Tele-Robotik-Anwendung erfüllen können. Weitere Experimente haben ferner belegt, dass alle entwickelten Komponenten dazu beitragen, und dass durch Weglassen eines der Module die Dienstgüteeanforderungen nicht mehr erfüllt werden können.

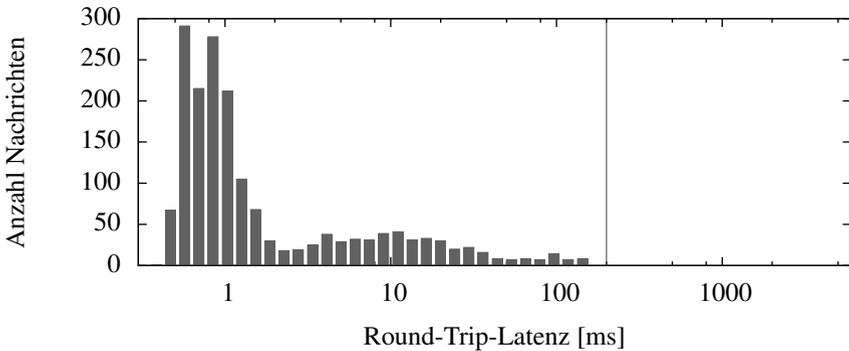


Abbildung 3: Vollständige Infrastruktur: Latenz Fernsteuerung

5 Zusammenfassung

Die Bereitstellung zuverlässiger Funkkommunikation für industrielle Anlagen ist eine große Herausforderung. In der zugrundeliegenden Doktorarbeit wurde eine Kommunikationsinfrastruktur entwickelt, welche die Vorteile der WMN-Technologie (Selbstorganisation und -reparatur, hohe Kapazität) mit einem Fehlertoleranz-Ansatz zur Steigerung der Zuverlässigkeit kombiniert.

Die Umsetzung als Regelkreis erlaubt es, zeitnah auf durch Dynamik und Mobilität verursachte Veränderungen zu reagieren. Durch die Bereitstellung von Ressourcenreserven kann der Dienst selbst in der Zeit zwischen Auftreten und Erkennen eines Fehlers aufrecht erhalten werden. Der zentralisierte Ansatz eignet sich für Anlagen bis zu einigen Hundert Meter Größe, und erlaubt die Einbindung mobiler Stationen. Dabei können Ende-zu-Ende-Dienstgütegarantien für Anwendungsdatenströme durchgesetzt werden.

Die Evaluierung hat gezeigt, dass die Infrastruktur in der Lage ist, die unterbrechungsfreie Fernsteuerung eines mobilen Roboters über ein größeres Areal zu gewährleisten. Damit ermöglicht das resultierende System den drahtlosen Betrieb industrieller Echtzeit-Anwendungen.

Die zur Erhöhung der Zuverlässigkeit entwickelten Mechanismen erlauben nicht nur speziell auf die QoS-Schnittstellen angepasste Anwendungen, sondern verbessern den Dienst allgemein. Insbesondere durch die beschleunigte Link-Ausfallerkennung und die Nutzung der Link-Kapazität als Routing-Metrik profitieren auch reguläre Anwendungen von einem schnelleren und zuverlässigeren Netz. Dies hat ein Netzwerktechnik-Hersteller zum Anlass genommen, die in der Doktorarbeit entwickelten Verfahren in seine Industrie-WLAN-Produktreihe zu integrieren.

Durch die im Vergleich zu bestehenden industriellen Funklösungen deutlich höhere Kapazität und Zuverlässigkeit werden auch neue Anwendungen möglich, die mit bisheriger Technologie nur schwer umsetzbar wären. So kann man z.B. die Techniker in einer Fabrik mit Augmented-Reality-Schnittstellen ausstatten, die aktuelle Sensorwerte aus den

Anlagen projizieren. Außerdem können die Mess- und Videodaten von verschiedenen Robotern aggregiert und mittels Sensorfusion für eine bessere Kooperation miteinander und Integration in die Umgebung genutzt werden.

Literatur

- [AWW05] I.F. Akyildiz, X. Wang und W. Wang. Wireless Mesh Networks: a survey. *Computer Networks*, 47(4):445–487, 2005.
- [IN12] Svilen Ivanov und Edgar Nett. *Wireless Mesh Networks*, Kapitel Achieving Fault-tolerant Network Topology in Wireless Mesh Networks. Intech, 2012.
- [LLN10] Timo Lindhorst, Georg Lukas und Edgar Nett. Modeling Fast Link Failure Detection for Dependable Wireless Mesh Networks. In *IEEE International Symposium on Network Computing and Applications*, Seiten 44–51. IEEE, July 2010.
- [LLN11] Georg Lukas, Timo Lindhorst und Edgar Nett. Modeling Medium Utilization for Admission Control in Industrial Wireless Mesh Networks. In *IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems*, Seiten 65–74. IEEE, 2011.
- [Luk12] Georg Lukas. *Fault-tolerant Industrial Wireless Mesh Network Infrastructure*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, September 2012.
- [SJB09] Thilo Sauter, Jürgen Jasperneite und Lucia Lo Bello. Towards New Hybrid Networks for Industrial Automation. In *ETFA'09: Proceedings of the 14th IEEE international conference on Emerging technologies & factory automation*, Seiten 1141–1148, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press.
- [SL09] Michael Schulze und Georg Lukas. MLCCA – Multi-Level Composability Check Architecture for Dependable Communication over Heterogeneous Networks. In *14th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2009)*, Mallorca, Spain, September 2009.
- [Wir10] IEC 62591 Ed. 1.0 – Industrial communication networks - Wireless communication network and communication profiles - WirelessHART, 2010.



Georg Lukas wurde am 24. September 1980 in Jekaterinburg geboren. Nach seinem Informatikstudium blieb er an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, um im Bereich der zuverlässigen Funkkommunikation zu promovieren.

Neben der universitären Forschung im Bereich WLAN-Kommunikation hat Herr Lukas freiberuflich als IT-Consultant gearbeitet, wo er Website-Security-Audits und Software-Anpassungen durchgeführt hat. Zur Zeit ist er als Berater bei der Firma rt-solutions.de GmbH tätig und entwickelt nebenberuflich Smartphone-Anwendungen für Amateurfunk- und Netzwerkkommunikation.