

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***M2M@Work - Leistungsfähigkeit von Internetzugangstechnologien
für zuverlässige M2M-Anwendungen***

der Forschungsstellen

- 1) Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Institut für industrielle Informationstechnik (inIT)
- 2) Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg (ifak)

Autoren: Lars Dürkop (init), Marko Krätzig (ifak)

Das IGF-Vorhaben 17715 BG der Forschungsvereinigung Elektrotechnik wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Lemgo, 13.11.2015

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jasperneite

Name und Unterschrift des Projektleiters
an der Forschungsstelle I

Magdeburg, 13.11.2015

Ort, Datum

Marko Krätzig

Name und Unterschrift des Projektleiters
an der Forschungsstelle II

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Einleitung	6
2.1	Maschine zu Maschine Kommunikation	6
2.2	Zielsetzung des Forschungsvorhabens	7
3	Grundlagen	9
3.1	Drahtgebundene Zugangstechnologien	9
3.1.1	Analoger Netzzugang	9
3.1.2	Integrated Services Digital Network (ISDN)	10
3.1.3	Digital Subscriber Line (DSL)	13
3.1.4	Kabelnetze	15
3.1.5	Power Line	15
3.1.6	Glasfaser	16
3.2	Drahtlose Zugangstechnologien	16
3.2.1	Global System for Mobile Communications (GSM)	16
3.2.2	Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)	22
3.2.3	Long Term Evolution (LTE)	29
3.2.4	Erreichbarkeit von Mobilgeräten	32
3.3	Anwendungsanalyse	33
4	Mess- und Auswertesystems	35
4.1	Anforderungen an das Mess- und Auswertesystem	35
4.2	Definition von Kenngrößen	35
4.2.1	Übertragungszeit (Transmission Time)	35
4.2.2	Anzahl korrekt empfangener Pakete	36
4.2.3	Anzahl verlorener Pakete	36
4.2.4	Paketverlustrate	37
4.3	Funktionsstruktur	37
4.4	Hardwareaufbau	37
4.4.1	Einleitung	37
4.4.2	Anritsu Analyser	38
4.4.3	Mobiler Labormessplatz	39
4.4.4	Embedded Plattform	40
4.4.5	Bewertung der Konzepte	42
4.5	Durchführung der Messungen	43
4.6	Permanente Messeinrichtung für M2M-Netze	44
5	Leistungsuntersuchungen von Internetzugangstechnologien	46

5.1	Einleitung	46
5.2	Analyseergebnisse	46
5.2.1	Netzzugangstechnologie GSM	46
5.2.2	Netzzugangstechnologie UMTS	52
5.2.3	Netzzugangstechnologie LTE	59
6	Analyse und Optimierung der Applikationsprotokolle	66
6.1	Netzwerkschicht	66
6.1.1	Internet Protokoll Version 6	66
6.1.2	Übergangsmechanismen	68
6.1.3	Zusammenfassung	75
6.2	Anwendungsprotokolle	75
7	Labortestumgebung	80
8	Projektergebnisse nach Arbeitspaketen und Verwendung der Mittel	81
9	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse	85
9.1	Wirtschaftsbereiche	85
9.2	Nutzen der angestrebten Forschungsergebnisse	85
9.3	Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU	85
10	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	86
10.1	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	86
10.2	Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens	86
10.3	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens	88
11	Literaturverzeichnis	90

1 Zusammenfassung

Zwar werden drahtgebundene und drahtlose Netzzugangstechnologien heutzutage schon mit sehr hoher Verbreitung genutzt, doch sind ihre grundlegenden Eigenschaften aus Sicht zuverlässiger Verbindungen nicht hinreichend untersucht. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Eigenschaften relevanter Netzzugangstechnologien auf ihre Eignung für die Automatisierungstechnik untersucht. Dazu wurden entsprechende Langzeitmessungen durchgeführt. Nach Abschluss der Untersuchungen ist ein klares Bild der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der heute verfügbaren Netzzugangstechnologien erarbeitet und deren Grenzen aufgezeigt.

Bei Feldtests ist allerdings nicht ersichtlich, ob das Netz, die Endgeräte oder die Anwendung für ein bestimmtes Verhalten verantwortlich sind. Mit der Labortestumgebung wurde daher eine reproduzierbare Testumgebung, bei welcher die nichtreproduzierbaren Schwankungen im Zeit- und Fehlverhalten der realen Übertragungsstrecke nachgebildet werden können, geschaffen. Mit dieser Labortestumgebung werden Geräteherstellern und Anwendungsentwicklern reproduzierbaren Bedingungen für entwicklungsbegleitende Prüfungen zur Verfügung gestellt.

Der Schwerpunkt des Projektes m2m@work lag auf der Analyse und Bewertung der Zuverlässigkeit von M2M-Verbindungen als Grundlage für die zukünftige erweiterte Nutzung für Anwendungsbereiche mit Echtzeitanforderungen. Dazu wurden Technologien und Standards von drahtgebundenen und drahtlosen Netzzugangstechnologien und ihr Zusammenwirken in einem M2M-Kommunikationssystem untersucht. Damit sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

Wie verhält sich das M2M-Kommunikationssystem bzgl. Zuverlässigkeitsanforderungen?

Echtzeitkritische Zuverlässigkeitsanforderungen können von M2M-Kommunikationssystemen nicht erfüllt werden. Da die vorhandenen Technologien nicht für automatisierungstechnische Anwendungen mit zyklischen Datenverkehr ausgelegt sind.

Welche Anwendungen können mit welchen Netzzugangstechniken zuverlässig realisiert werden?

Die jetzt schon etablierten Anwendungsfälle wie Fernwirkung, Fernwartung und Fernüberwachung können mit den vorhandenen Netzzugangstechnologien realisiert werden. Aber automatisierungstechnische Anwendungen mit Echtzeitanforderungen und harten Zeitgrenzwerten im Millisekunden Bereich können nicht realisiert werden.

Gibt es Möglichkeiten der Adaption auf das Streckenverhalten aus Sicht der Endgeräte?

Eine Adaption auf das Streckenverhalten ist nur bedingt möglich. Da eine Prognose des Streckenverhalten wegen zu vieler unbekannter Einflussgrößen nicht möglich ist. Das statische Zeitverhalten kann sich zeitabhängig deutlich ändern und die Ursachen für diese Änderungen sind weitestgehend unbekannt. Allerdings können Mechanismen integriert werden, welche eine Verfügbarkeit der Kommunikation erhöhen. Dazu einfache Mechanismen wie ein zyklischer Verbindungsaufbau zum Internet oder gar Neustart der M2M-Geräte.

Wie kann man M2M-Equipment und M2M-Anwendungen reproduzierbar testen?

Das Zeit- und Fehlverhalten von realen Übertragungsstrecken variiert sehr stark. Zudem treten sporadisch hohe Übertragungszeiten und Paketausfälle auf, wobei dessen Ursache unergründet bleibt. Reproduzierbare Untersuchung können aus diesem Grund nur durchgeführt werden, wenn alle Einflussgrößen der Übertragungsstrecke parametrierbar sind. Das betrifft die Einflussgrößen des Internets und der Netzzugangstechnologie. Eine Möglichkeit für reproduzierbare Untersuchungen von M2M-Geräten und M2M-Anwendungen ist die in Abschnitt 7 beschriebene Labortestumgebung.

Durch die Beantwortung der genannten Fragestellungen wurde das Forschungsziel erreicht.

2 Einleitung

2.1 Maschine zu Maschine Kommunikation

Der automatisierte Informationsaustausch zwischen elektrotechnischen Geräten wird allgemein als Maschine-zu-Maschine (M2M) Kommunikation bezeichnet. Der typische Aufbau einer M2M-Anwendung besteht aus einem Datenendpunkt (DEP), z.B. einer zu überwachenden Maschine, dem Datenintegrationspunkt (DIP), in der Regel einer zentralen Leitwarte an der die Daten zusammengeführt und ausgewertet werden, und dem verbindenden Kommunikationsnetz.

Klassische Bereiche der M2M-Kommunikation sind z.B. die Telemetrie (Fernmessung), Fernwartung und Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). Die Anwendungsfelder sind sehr weit gestreut und reichen von wassertechnischen Anlagen (z.B. Pumpstationen), Wettererfassungssystemen, Produktionsprozessüberwachungen bis hin zur Steuerung von Energienetzen und Flottenmanagementsystemen ([1], [2], [3]).

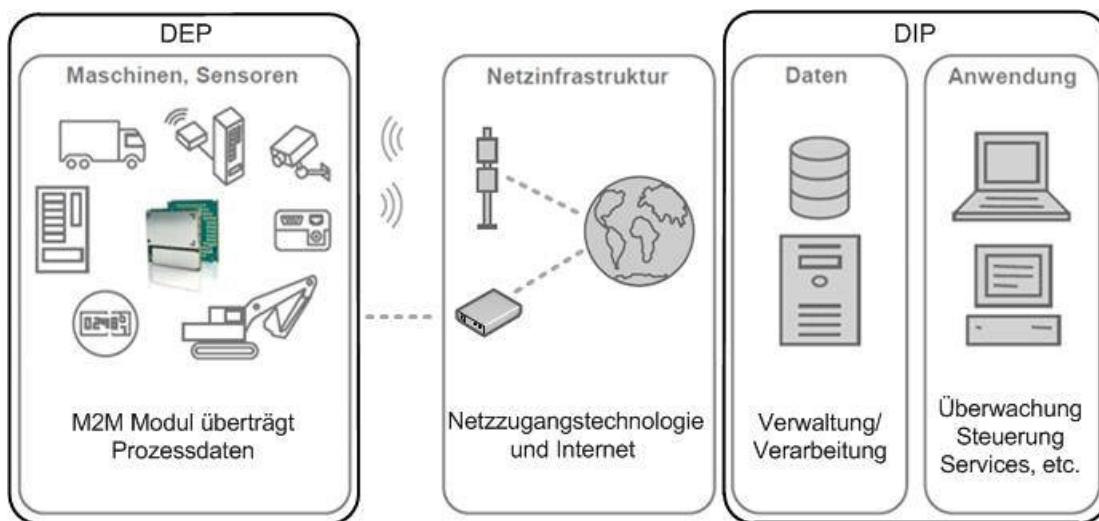


Abbildung 1: Abbildung 1: Typischer Aufbau einer M2M Anwendung [4]

Die Systemintegratoren, Dienstleistungsanbieter und auch Komponenten- und Gerätehersteller im M2M-Umfeld sind meist KMUs. Im Rahmen der generell zunehmenden Automatisierung, Vernetzung und Datenverarbeitung nimmt auch der Bedarf an Maschinenkommunikation über weite Entfernungen zu. Damit steigt die Anzahl und Bedeutung von M2M-Anwendungen stetig. Beispielsweise spielt ein schneller, weltweiter Service für den Maschinen- und Anlagenbau eine wesentliche Rolle. Zuverlässige M2M-Verbindungen gewinnen für Fernzugriffe, Inbetriebnahmeunterstützung, Diagnose und Wartung an Bedeutung. Beispiele sind hier Zustandsüberwachung (Condition Monitoring), Online-Simulation und das Remote Teach-In für Roboter zu nennen. Dienstleister können so ihre qualifizierten Mitarbeiter effizienter einsetzen und Reisekosten einsparen. Anlagenbetreiber profitieren vor allem durch höhere Anlagenverfügbarkeit bzw. Reduzierung von Stillstandzeiten.

Weitere automatisierungstechnische Anwendungsfälle für zuverlässige M2M-Verbindungen sind die Verwendung von Optimierungssteuerungen – hier wird von einer entfernten Zentrale aus auf mehrere verteilte lokale Steuerungssysteme zugegriffen und eine Optimierung der Parametereinstellung der lokalen Steuerung vorgenommen. Ein Einsatz ist die Optimierung von dezentralen Biogasanlagen, da hier eine Optimierungssteuerung pro Anlage nicht rentabel ist, aber ohne sie können Einzelanlagen nicht wirtschaftlich arbeiten.

Gerade auch für den zunehmenden Bedarf an automatisierter Koordination der verteilten Energieeinspeisung in die Energienetze (virtuelle Kraftwerke und Smart Grids), die automatisierte Verbrauchserfassung [5] und die automatische Koordination des

Energiekonsums insbesondere von Großverbrauchsanlagen werden zukünftig vermehrt zuverlässige M2M-Verbindungen benötigt.

Aufgrund der geografischen Entfernung wird häufig das Internet als Kommunikationsnetz genutzt, um die Endpunkte miteinander zu verbinden. Mit der damit stark zunehmenden Verbreitung von Internetprotokoll basierten Kommunikationssystemen für M2M-Anwendungen mit unterschiedlichen Netzzugangstechnologien stellen sich Fragen nach der Zuverlässigkeit und die mit den Protokollen und eingesetzten Technologien verbundenen Risiken. Oft ist bei auftretenden Problemen unklar, ob die Ursache das Protokoll, das Netz, die Komponenten oder die jeweilige Konfiguration ist. Aktuelle Forschungsgebiete, wie das Internet der Dinge, Smart Grids, Car-to-X, eHealth, Industrie 4.0 oder Cyber-physikalische Systeme (CPS) [6] setzen eine zuverlässige M2M-Kommunikation in Verbindung mit eingebetteten Systemen voraus.

2.2 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Es besteht dringender Bedarf, ein besseres Verständnis über das Verhalten von M2M-Verbindungen zu erarbeiten. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von M2M-Anwendungen besteht ein wesentliches Ziel bei M2M@Work daher darin, durch Langzeitmessungen das Verhalten mit verschiedenen Netzzugangstechnologien zu untersuchen und damit für Aufklärung zu sorgen.

Hierbei soll den Wechselwirkungen zwischen den eingesetzten Kommunikationstechnologien und den Fernwirkprotokollen besonderes Augenmerk gewidmet werden. Dies gilt im speziellen für die drahtlosen Internetzugangstechnologien. Anders als der leitungsgeführte Übertragungskanal variiert der drahtlose Übertragungskanal sehr stark aufgrund von Mehrwegeausbreitungen in Zeit und Raum und es besteht eine durch Energiesparmaßnahmen verursachte Korrelation von Leistungsfähigkeit und Datendurchsatz. Das führt in der Konsequenz zu Fehlerhäufungen und kann zu unerwünschtem Verhalten in den Transport- oder Anwendungsprotokollen führen.

Aus diesem Grund sollen im Projekt M2M@Work Netzzugangstechnologien einer messtechnischen Leistungsbewertung unterzogen werden. Die messtechnischen Leistungsbewertungen an realen Systemen haben den Vorteil, dass der Aufwand für eine Validierung deutlich geringer ist als bei modellbasierten Ansätzen. Auch darf davon ausgegangen werden, dass eine derart komplexe Untersuchungsumgebung nicht hinreichend genau modelliert werden kann. Dafür stellen messtechnische Untersuchungen aber lediglich Momentaufnahmen der jeweils eingesetzten Technik dar. Daher soll in diesem Vorhaben eine geeignete Vorrichtung für Langzeitmessungen entwickelt und installiert werden.

Die Entwicklung von M2M-Komponenten und M2M-Applikationen erfolgt heute üblicherweise unter Nutzung der realen Netze. Hierbei stellen sich durch Schwankungen in den Netzbedingungen (Auslastung, Belegung, Feldstärke usw.) unterschiedliche Zustände ein, die nicht reproduzierbar sind. Daher besteht ein besonderer Bedarf an der Bereitstellung einer Labortestumgebung für entwicklungsbegleitende, reproduzierbare Tests für Hersteller von entsprechenden M2M-Komponenten und Anbietern von M2M-Applikationen. Dies gilt auch vor dem Hintergrund, dass Hersteller von M2M-Komponenten häufig kleine und mittlere Unternehmen sind und nicht über spezielles Testequipment verfügen.

Die Ergebnisse der Langzeitmessungen an realen Strecken sollen daher neben den oben beschriebenen Zielsetzungen auch dazu genutzt werden, um die entsprechenden Systemparameter für eine Labormessumgebung bestehend aus Weitverkehrs- und Mobilfunk-Netzemulators abzuleiten. In einer solchen Labortestumgebung sollen sogenannte pathologische Testfälle reproduzierbar nachgebildet werden, also Situationen, bei der multiple Parameter oder Bedingungen gleichzeitig extreme, aber noch innerhalb der Spezifikation liegende, Werte annehmen können. Hierdurch wird ein wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung von M2M-Produkten und Dienstleistungen erbracht.

Aus der Darstellung zum Stand der Technik von IPv6 ist deutlich zu erkennen, dass dieses Protokoll ein großes Potential insbesondere auch für M2M-Anwendungen aufweist. Hier sind Vereinfachungen bei der Konfiguration und der Administration zu erwarten. Interessant sind auch die zu erhoffenden, verbesserten Leistungskennwerte bei der Übertragung der Daten unter Nutzung der QoS-Flow Labels. Ziel ist es daher, in diesem Vorhaben die Leistungsfähigkeit und Technik von IPv6 zu untersuchen und IPv4 gegenüberzustellen.

Ein weiterer Aspekt, der hier untersucht werden soll, ist die Verfügbarkeit der Technologie für M2M-Anwender, wobei öffentliche native Netzwerke, Provider für IPv6 und entsprechende Zugänge analysiert werden. Chancen und Auswirkungen für M2M-Hersteller sind derzeit unklar. Das betrifft neben der Verfügbarkeit auch die Anwendbarkeit, die Zuverlässigkeit als auch den Sicherheitsaspekt.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden Netzzugangstechnologien beschrieben, die es ermöglichen, Maschinen mit dem Internet zu verbinden. Die Möglichkeit des Transports von IP-basierten Daten ist daher eine Grundvoraussetzung für alle betrachteten Netzzugangstechnologien.

3.1 Drahtgebundene Zugangstechnologien

Im folgenden Kapitel werden die drahtgebundenen Zugangstechnologien beschrieben. Als mögliche Lösungen für den drahtgebundenen Zugang zum Internet, sind das analoge Telefonnetz, ISDN, verschiedene Varianten von DSL, sowie das Kabelnetz, Glasfasernetz und das vorhandene Stromversorgungsnetz (Powerline) zu nennen. Die unterschiedlichen Zugangstechnologien werden mit einem Schwerpunkt auf die Datenübertragung beschrieben.

3.1.1 Analoger Netzzugang

Bei älteren Telefonnetzen bestehen alle Bestandteile der Übertragungsstrecke aus Analogtechnik (analoge Endgeräte, analoge Vermittlungsstelle und analoge Übertragungstechnik). Doch seit 1980 wurden die analogen Telefonnetze nach und nach in digitale Netze umgewandelt, welche herkömmliche Sprachdienste und zusätzliche digitale Dienste anbieten.

Die Teilnehmeranschlussleitung, die von der Weitverkehrsvermittlung direkt zum Endteilnehmer führt, ist als analoge Übertragungsstrecke ausgelegt. Für die Übertragung von digitalen Daten müssen diese vor der Übertragung zunächst in analoge Signale umgewandelt werden, bevor sie über die Teilnehmeranschlussleitung zur nächsten Weitverkehrsvermittlungsstelle gelangen, die die Daten für die Weiterübertragung wieder in Digitalsignale umsetzt.

Jeder Endteilnehmer, der über das analoge Telefonnetz eine Datenübertragung vornehmen will, benötigt dazu ein Modem. Bei der Modulation wird das Frequenzspektrum des originalen Digitalsignals (Basisbandsignal) in den vom analogen Telefonnetz übertragbaren Frequenzbereich von 300 Hz bis 4000 Hz verschoben, während die Demodulation diese Verschiebung wieder rückgängig macht.

Die Übertragungsgeschwindigkeit bzw. Datenübertragungsrate ist abhängig vom Übertragungsverfahren. Die typischen Datenübertragungsraten sind 14400 bit/s (V.32), 33600 bit/s (V.34bis) und 56000 bit/s (V.56flex von Rockwell, X2-Technologie von US Robotics). Dabei ist zu beachten, dass diese Übertragungsgeschwindigkeit nur in Richtung des Clients (Download) vorhanden ist, die Datenübertragung in Richtung Server (Upload) erfolgt mit maximal 33600 bit/s.

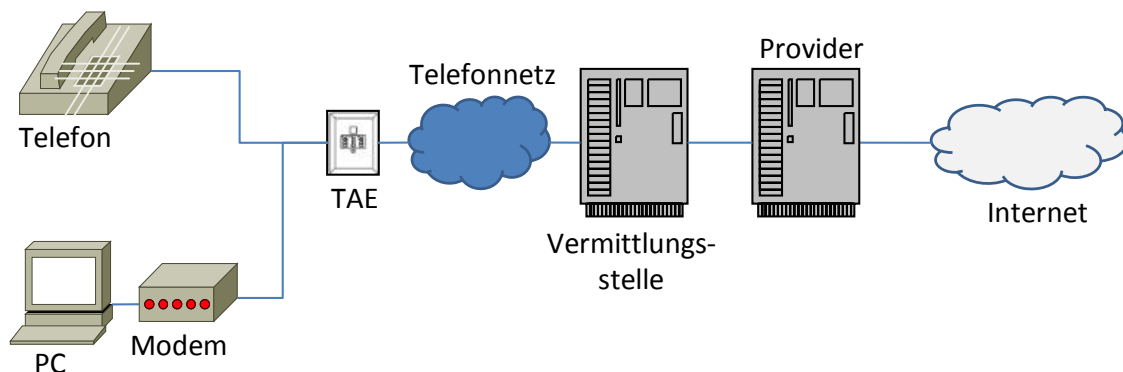


Abbildung 2: Analoger Anschluss

Die ITU-T/CCITT hat verschiedene Betriebsarten für Modems definiert, die eine Übertragung mit unterschiedlichen Leistungsdaten und Charakteristika gestatten. Die untenstehende Tabelle zeigt eine Auswahl der von der ITU-T/CCITT spezifizierten Modem-Standards.

Tabelle 1: Modem Standards der ITU-T/CCITT

Typ	Betriebsart	Max. Bandbreite [bit/s]	Modulation	Übertragung
V.21	Asynchron, Synchron	<300	2-FSK	Duplex
V.22	Asynchron, Synchron	300, 600, 1200	4-FSK	Duplex
V.23	Asynchron, Synchron	600, 1200	FKS	Halbduplex
V.26	Synchron	1200, 2400	4-DPSK	Duplex
V.27	Synchron	4800	8-PSK	Duplex
V.29	Synchron	9600	4-QAM; 16-QAM	Duplex
V.32	Asynchron, Synchron	9600	16-QAM	Duplex
V.34	Asynchron, Synchron	33600	256-QAM/TCM	Duplex
V.90	Asynchron	56000	PCM	Downstream
	Asynchron	336000	256-QAM/TCM	Upstream
V.92	Asynchron.	56000	PCM	Downstream
	Asynchron	48000	PCM	Upstream

3.1.2 Integrated Services Digital Network (ISDN)

Integrated Services Digital Network (ISDN) bezeichnet einen internationaler Standard für ein digitales dienstintegriertes Telekommunikationsnetz. ISDN unterstützt die Dienste Fernsprechen (analog, digital), FAX (Gruppe 3, 4), Datenübertragung (verschiedene Geschwindigkeiten), Teletex, Bildtelefonie und weitere integriert Dienst, d.h. sie können von einem Basisanschluss aus in Anspruch genommen werden. Darüber hinaus stehen bei ISDN Dienstmerkmale zur Verfügung wie z.B. Rufumleitung, Dreierkonferenz, Rückrufen bei besetzt, Anklopfen usw. [22], [23], [24], [25], [26].

Die Endgeräte werden beim ISDN über zwei standardisierte Schnittstellen (Basisanschluss S_0 und Primärmultiplexanschluss S_m) angeschlossen.

Am Basisanschluss (BA: Basic Access) stehen zwei Kanäle mit je 64 kBit/s (B-Kanal) und ein Kanal mit 16 kBit/s (D-Kanal) zur Verfügung. Alle drei Kanäle (2xB-Kanal; D-Kanal) sind als vollduplex Kanäle ausgelegt. Die B-Kanäle stehen für Nutzinformationen und der D-Kanal steht für die Signalisierung zur Verfügung. Zudem ist der D-Kanal für die Übermittlung paketierter Signalisierungsnachrichten ausgelegt und kann für Nutzsignale mit niedrigem Datenaufkommen (wie Telemetrie, Alarm- und Steuersignale) verwendet werden. In Abbildung 3 ist eine typische Ausführung des Basisanschlusses dargestellt. Am Netzabschluss NT endet die Zuständigkeit des Netzbetreibers. Hier beginnt die vieradrige, busmäßig ausgelegte Verdrahtung (SBus). An diesem Bus können bis zu 8 Endgeräte an einheitlichen Steckdosen angeschaltet werden.

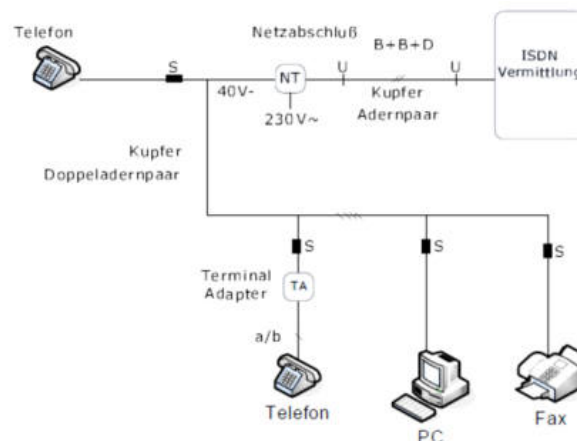


Abbildung 3: Beispiel für die Auslegung des Basisanschlusses (NT) [26]

Der Primärmultiplexanschluss (PRA: Primary Rate Access) stellt 30 B-Kanäle und ein D-Kanal zur Verfügung. Alle Kanäle sind als voll duplex Kanäle mit 64 kbit/s ausgelegt. Die B-Kanäle sind wiederum als Nutzkanäle, der D-Kanal als Signalisierungskanal konzipiert. Auf den PRA wird nicht näher eingegangen, da der als vierdrähtige Punkt-zu-Punkt Verbindung ausgelegte PRA hauptsächlich für die Anschaltung von Nebenstellenanlagen eingesetzt wird.

Das ISDN arbeitet verbindungsorientiert und spezifiziert daher die ersten drei Schichten im OSI Referenzmodell. Die erste Schicht (physikalische Schicht) definiert die Nutzdatenübertragung. Die Verbindungssteuerung erfolgt in den Schichten 1 bis 3 (Bitübertragungs-, Sicherungs- und Vermittlungsschicht). Zwischen dem Endgerät und der Vermittlungsstelle wird dafür das D-Kanalprotokoll mit 16 kbit/s zur Steuerung von 2 bzw. 30 Nutzkanälen verwendet, welches im Zeit-multiplexverfahren mit den beiden Sprachkanälen über die Teilnehmer-Anschlussleitung übertragen wird. Zwischen den Vermittlungsstellen wird das Zeichengabeverfahren Nr. 7 (ZGV7) eingesetzt, welches mit 64 kbit/s arbeitet und über ein vom Sprechwegenetz unabhängiges Zeichengabenetz übertragen wird. Je Signalisierungsweg können mehrere 100 Nutzkanäle bedient werden. Alle höheren Schichten müssen im Endgerät aktiviert sein.

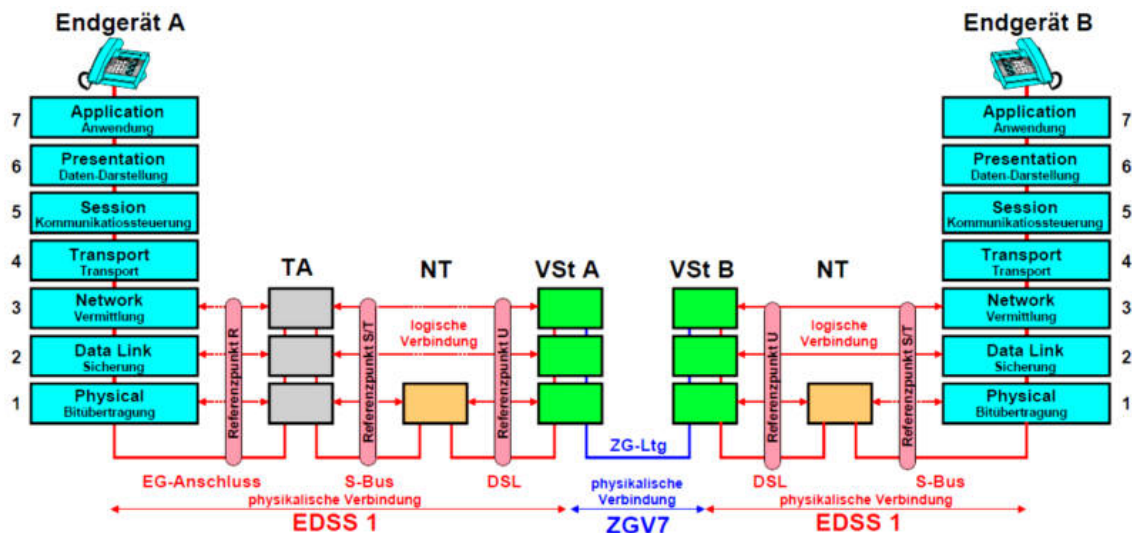


Abbildung 4: ISDN Protokollarchitektur [25]

Die folgenden Dienste stehen laut [23] zur Verfügung:

ISDN Telefonie:

Im ISDN wird eine Sprachübertragung mit einer Bandbreite von 3.1 kHz garantiert. Die Telefone verfügen entweder über eine eingebaute Intelligenz zur Kommunikation mit dem Netz und werden direkt an den S0-Bus angeschlossen. Bei Verwendung eines a/b Telefons muss ihnen die Intelligenz zur Kommunikation mit dem Netz in Gestalt eines Terminaladapters a/b hinzugefügt werden. Mit größerem technischem Aufwand lässt sich auch (bei Benutzung des gleichen 64 kbit/s Kanals) eine Bandbreite von 7 kHz erreichen. Dazu werden zwei Teilbänder gebildet. Das untere Teilband wird mit 6 bit quantisiert, das obere mit 2 bit. Durch eine Differenz-Puls-Code-Modulation werden nur die Unterschiede von einem Abtastwert des Analogsignals zum nächsten quantisiert.

Fax Gruppe 3:

Es werden die aus dem analogen Fernsprechnetzen bekannten Geräte mit einem Terminaladapter a/b verwendet. Die Übertragungsgeschwindigkeit liegt zwischen 4800 bit/s und 14400 bit/s, bei einer Auflösung von 200 Bildpunkten pro Zoll.

Fax Gruppe 4:

Dieser speziell für das ISDN entwickelte Fax-Dienst benutzt die volle Bitrate eines B-Kanals von 64 kbit/s. Damit kann sowohl die Auflösung (auf bis 400 Bildpunkte pro Zoll), als auch die Übertragungsgeschwindigkeit der Dokumente vergrößert werden.

Leitungsvermittelte Datenübertragung:

Endgeräte, die am Leitungsvermittelten Datennetz (DATEX-L der DTAG) betrieben wurden, werden über Terminaladapter X.21 an das ISDN angeschlossen. Im Leitungsvermittelten Datennetz gelten gemäß ITU-T Empfehlung X.1 die Nutzerklassen (User Classes UC):

Tabelle 2: Geschwindigkeitsklassen im Datex-L

UC	ITU-T Empfehlung	Übertragungsgeschwindigkeit
4	X21/X21	≤ 2400 bit/s
5	X21/X21	≤ 4800 bit/s
6	X21/X21	≤ 9600 bit/s
7	X21/X21	≤ 48000 bit/s
19	X21/X21	≤ 64000 bit/s

Übertragungsgeschwindigkeit des B-Kanals vornehmen. Diese Anpassung erfolgt dadurch, dass die informationstragenden Bits, in bestimmte der 8000 pro Sekunde im B-Kanal übertragenen Oktette, an einer festgelegten Bitposition einsortiert werden.

Paketvermittelte Datenübertragung

Endgeräte für das Paketvermittelte Datennetz können entweder über Terminaladapter angeschlossen werden oder, bei entsprechender Eigenintelligenz, direkt an den S0-Bus. Es kann sowohl der B-Kanal mit 64 kbit/s, als auch der D-Kanal mit 9,6 kbit/sec verwendet werden. Das ISDN dient hierbei in verschiedenen Varianten als Zugang zum Paket-Daten-Netz (PSPDN, Packet Switched Public Data Network). Man unterscheidet nachstehende Benutzerklassen

Tabelle 3: Geschwindigkeitsklassen im Datex-P

UC	ITU-T Empfehlung	Übertragungsgeschwindigkeit
8	X.25	≤ 2400 bit/s
9	X.25	≤ 4800 bit/s
10	X.25	≤ 9600 bit/s
11	X.25	≤ 48000 bit/s
13	X.25	≤ 64000 bit/s

Bildschirmtext:

Dieser in Deutschland Btx, international Videotex, genannt Dienst, diente dem Zugang auf verteilte Datenbanken (Beispiel Homebanking). Er wurde anfänglich über Modems auf analogen Telefonleitungen betrieben. Dieser 1984 in Deutschland eingeführte Dienst wurde 1993 in Datex-J und 1995 in T-Online umbenannt. Für T-Online wird in verschiedenen Dokumenten auch Btx-neu geschrieben.

Bildtelefonie:

Bei der Bildübermittlung wird zwischen Festbild- und Bewegtbild-Übertragung unterschieden. Bei Festbildübermittlung wird alle 5-10 Sekunden ein Bild übertragen und dazwischen Sprache. Videotelefonie soll bewegte Bilder vom Gesprächspartner übertragen. Für kommerziell angebotene Videokonferenzen (in besonderen Studios) werden

Übertragungswege bestehend aus 8 B-Kanälen und mehr eingesetzt. Soll Videotelefonie über ein oder zwei B-Kanäle des ISDN-Basisanschlusses betrieben werden, so wird trotz einer ausgefeilten Technologie bei der Bildverarbeitung keine Fernsehqualität erreicht.

Fernwirken:

Beim Fernwirken werden Signale über das ISDN übertragen, die auf der Empfängerseite zur Steuerung von Anlagen benutzt werden. Umgekehrt werden Messwerte aus den ferngesteuerten Aggregaten zur Überwachung von Prozessen verwendet.

Teletex:

Teletex wurde entwickelt, als der eingeschränkte Zeichensatz der normalen Fernschreibmaschine den Erfordernissen der Schriftkultur in den Büros nicht mehr genügte. Sender und Empfänger sind sogenannte Bürofernreiber, die heute weitestgehend durch PCs abgelöst worden sind. Der Anschluss eines Bürofernreibers an den S0-Bus muss über einen Terminaladapter erfolgen.

Mixed Mode:

Mixed Mode oder Textfax stellt eine Integration von Telefax- und Teletex- Dienst dar. Im Gegensatz zum Fax-Dokument erfolgt die Codierung so, dass man Bild und Text auf der Empfängerseite getrennt bearbeiten, d.h. editieren kann. Grundlage für ein solches Verfahren sind umfangreiche internationale Empfehlungen, die eine einheitliche Dokumentenarchitektur festlegen. Die Terminaladapter haben einerseits wieder die Aufgabe der Kommunikation mit dem Netz. Andererseits müssen sie die Anpassung der Bitraten (Rate Adaption) an die

3.1.3 Digital Subscriber Line (DSL)

Der digitale Teilnehmeranschluss (Digital Subscriber Line), kurz DSL, nutzt für die Datenübertragung die vorhandenen Kupfer-Doppeladern zwischen Endanwender und Vermittlungsstelle. Dafür wird der erweiterte Frequenzbereich für die Datenübertragung verwendet (d.h. $>120\text{kHz}$). Die spektrale Leistungsdichte für einen Teil der DSL Übertragungsfrequenzen ist in Abbildung 5 dargestellt. Die verschiedenen Frequenzbereiche der einzelnen asynchronen DSL-Typen ist in Abbildung 6 dargestellt. Daran wird deutlich, dass für DSL mit hohen Datenübertragungsraten ein Frequenzbereich bis 30 MHz verwendet.

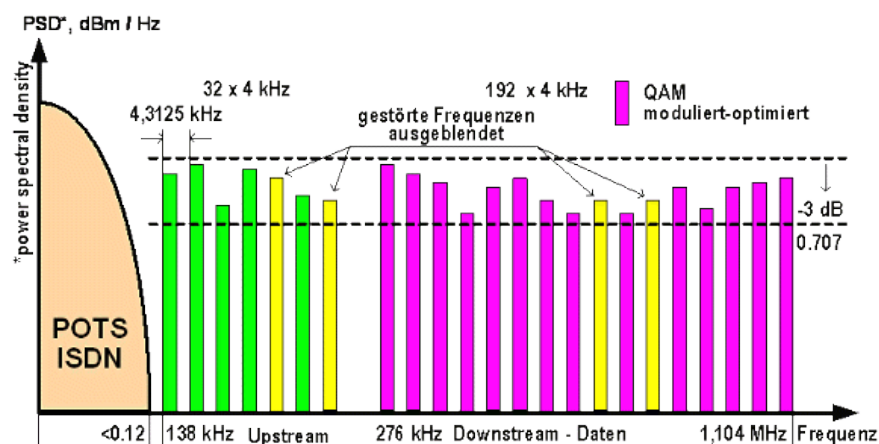


Abbildung 5: Spektrale Leistungsdichte der DLS Frequenzen [27]

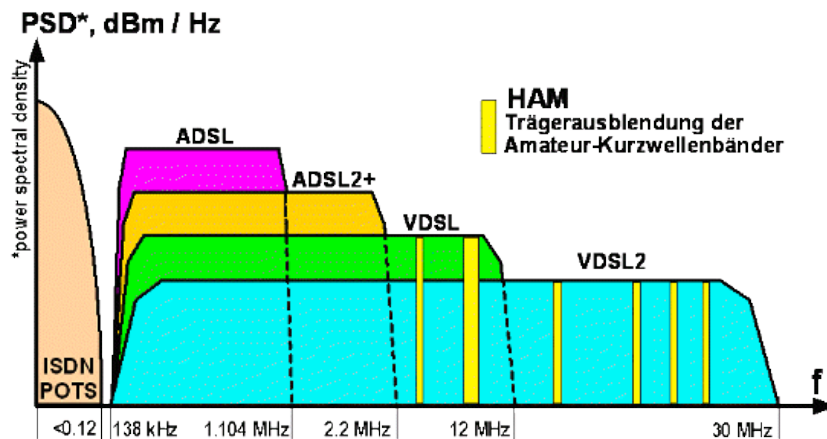


Abbildung 6: Frequenzbereiche der DSL-Typen [27]

Eine Übersicht mit den verschiedenen DSL-Typen mit den Bezeichnung und Datenübertragungsrate für die Down- und Upstream Richtung ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: DSL Typen

Typ	Bezeichnung	DSL Anschluss	Datenübertragungsrate	
			Downstream	Upstream
DSL	Digital Subscriber Line	-	160 Kbit/s	160 Kbit/s
HDSL	High data rate DSL	-	1.544 Kbit/s (2xtwisted pair) 2.048 Kbit/s (3xtwisted pair)	1.544 Kbit/s (2xtwisted pair) 2.048 Kbit/s (3xtwisted pair)
SDSL, SHDSL	Single line DSL Symmetric DSL	-	2048 kBit/s	2048 kBit/s
ADSL	Asymmetric DSL	DSL1000	384 kBit/s 768 kBit/s 1024 kBit/s	64 kBit/s 128 kBit/s 128 kBit/s
		DSL2000	384 kBit/s - 2048 kBit/s	64 kBit/s – 192 kBit/s (optional 384 kBit/s)
		DSL6000	2048 kBit/s – 6016 kBit/s	192 kBit/s – 576 kBit/s
ADSL2+	Asymmetric DSL	DSL16000	6304 kBit/s – 16000 kBit/s	576 kBit/s - 1024 kBit/s
		DSL 16 Plus	10000 kBit/s – 16000 kBit/s	800 kBit/s – 1000 kBit/s
VDSL	Very high data rate DSL	VDSL25	17100 kBit/s – 25064 kBit/s	1638 kBit/s – 5120 kBit/s
		VDSL50	28544 kBit/s – 51392 kBit/s	2720 kBit/s – 10240 kBit/s

Für den Anschluss eines digitalen Endgerätes an das Internet wird für die Signalanpassung ein DSL-Router/Modem benötigt. Zudem ist ein Splitter notwendig, welcher mittels Tiefpass die Telefonsignale und mittels Bandpass die DSL Signale trennt und zusammenführt.

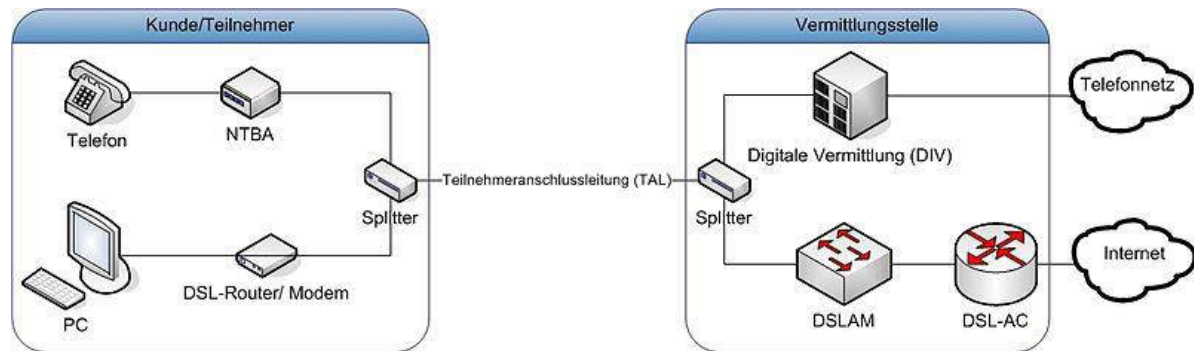


Abbildung 7: Internetanschluss mittels DSL

3.1.4 Kabelnetze

Als Alternative zu DSL bieten Kabelnetzbetreiber einen Internetzugang über das Breitbandkabelnetz, welches für eine Vielzahl von Fernsehkanälen ausgelegt ist, an. Dafür werden die bestehenden Koaxialkabel-Netze mit sehr guter Abschirmung für hohe Datenübertragungsraten verwendet.

Für den Internetzugang wird auf Endanwenderseite ein Kabelmodem benötigt. Das Gegenstück zum Kabelmodem beim Kabelnetzbetreiber wird Cable Modem Termination System (CMTS) genannt. Ein CMTS bedient je nach Ausbaustufe bis zu 50.000 Endanwender.

Die Anbieter EuroDOCSIS bietet Datenübertragungsraten von 56 MBit/s Down- und 31 MBit/s Upstream geteilt mit anderen Nutzern an, die Firma Unitymedia hat 128 MBit/s Down- und 5 MBit/s Upstream und Kabel Deutschland 100 MBit/s Down- und 6 MBit/s Upstream im Angebot

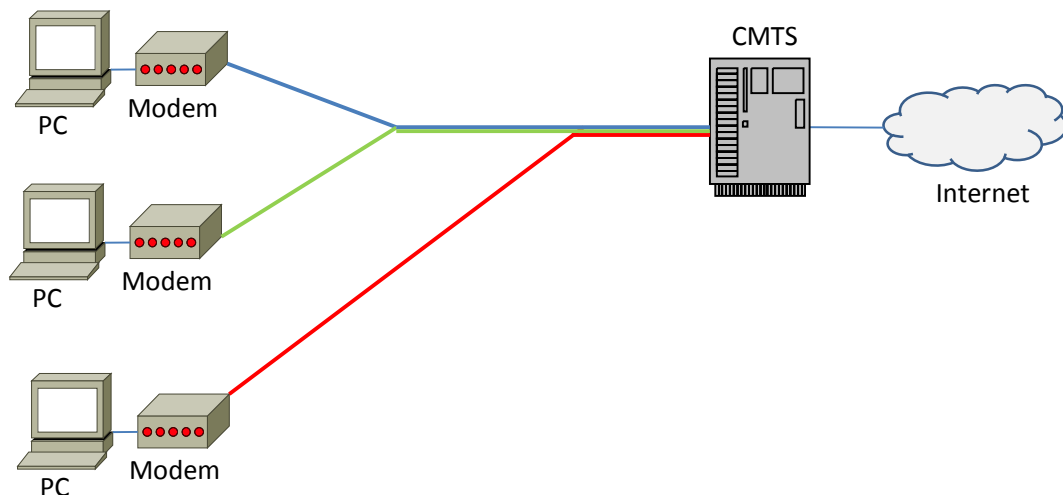


Abbildung 8: Internetverbindung mittels Kabel

3.1.5 Power Line

Power Line bezeichnet den Internetzugang über Stromnetze. Dabei sind die Datenraten bei Power Line sehr stark von der Leitungslänge und Störgrößen abhängig. Der große Vorteil ist, dass das Stromnetz quasi überall vorhanden ist. Ein Nachteil ist, dass das Stromnetz nicht für Datenübertragung ausgelegt (keine Abschirmung, viele Verzweigungen) ist. Die Störgrößen, insbesondere bei hohen Datenraten, sind sehr schwer in den Griff zu bekommen

Seit Juli 2013 wird aktiv am Standard P1901.2 (IEEE-"Standard for Low Frequency (less than 500 kHz) Narrow Band Power Line Communications for Smart Grid Applications")

gearbeitet. Mit dem Standard P1901.2 soll ein Kernbaustein für Smart Grid werden, indem es Mess- und Steuerdaten von Versorgungsnetzen (Strom, Gas, Wasser) auf der Stromleitung in und außerhalb von Gebäuden transportiert. Das geschieht über ein schmalbandiges Powerline-Signal zwischen 150 und 500 kHz mit maximal 500 kBit/s brutto [29]. Zusätzlich gibt es seit 2011 die technische Spezifikation ETSI TS 103 908 v.1.1.1 [30], welche ein schmalbandiges Powerline-Signal zwischen 9 und 95 kHz mit einer maximalen Datenübertragungsrate von 3,6 kBit/s vorsieht.

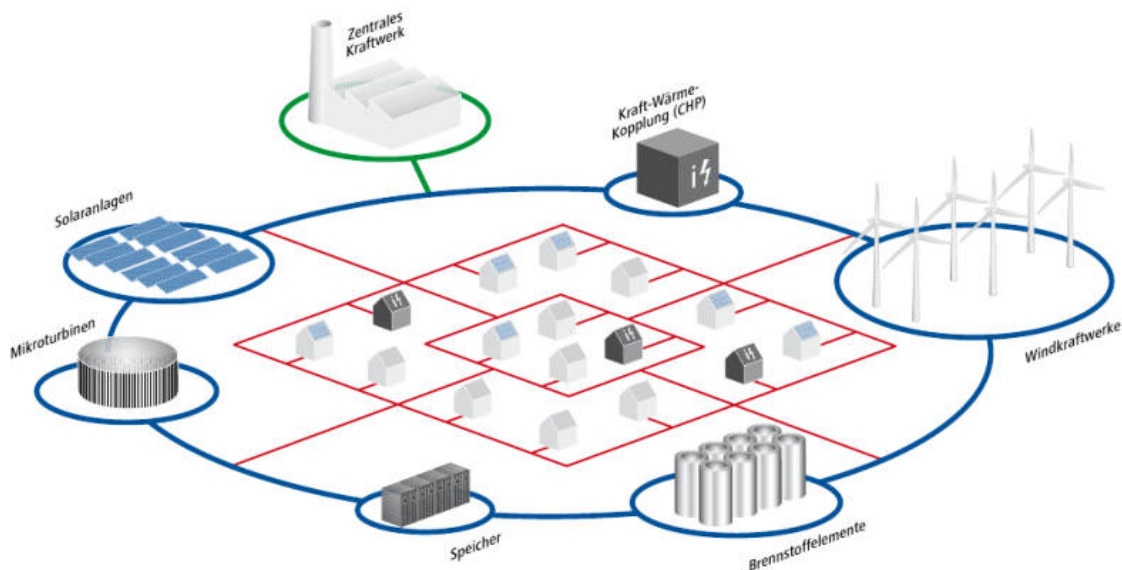


Abbildung 9: Beispiel für die Powerline-Datenübertragung fürs Smart Grid [29]

3.1.6 Glasfaser

Glasfaser ist als ein weiterer Breitband-Internetzugang zu nennen. Dabei endet der Glasfaser-Ausbau nicht im Kabelverzweiger vor dem Haus, sondern wird bis zum Endnutzer geführt. Dafür wird ein Glasfaseranschluss für den Endnutzer zur Verfügung gestellt. Für den Internetzugang wird auf Endanwenderseite ein Modem benötigt.

Die Datenübertragungsraten bei Glasfaser beträgt 200 MBit/s Down- und 100 MBit/s Upstream.

3.2 Drahtlose Zugangstechnologien

In diesem Kapitel werden Technologien beschrieben, die es ermöglichen, abgelegene Standorte ohne Zugang zu drahtgebundenen Zugangsnetzen mit dem Internet zu verbinden. Als mögliche Lösungen existieren hier insbesondere der Mobilfunk und die satellitengestützte Kommunikation. Über beide Systeme werden die mobilen Endgeräte mit den Netzen des jeweiligen Anbieters verbunden, welche wiederum über Schnittstellen zum öffentlichen Internet verfügen. Im nachfolgenden werden die unterschiedlichen Systeme mit einem Schwerpunkt auf die Datenübertragung beschrieben. Die Funktionen zur Mobilitätsunterstützung, Authentifizierung, Signalisierung usw. werden dabei vernachlässigt.

3.2.1 Global System for Mobile Communications (GSM)

Das Global System for Mobile Communications (GSM) ist ein weltweit verbreitetes, voll digitales Mobilfunksystem der zweiten Generation (zur ersten Generation werden die inzwischen abgeschalteten analogen Netze gezählt). Das GSM-Netz ist hierarchisch gegliedert, der grundlegende Aufbau ist in Abbildung 10 dargestellt.

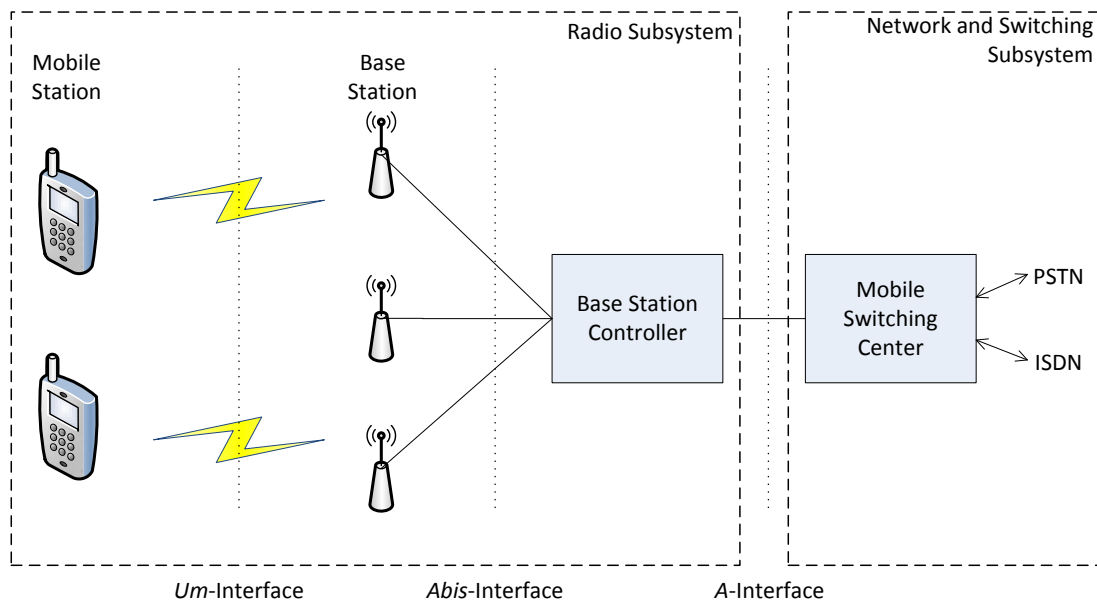


Abbildung 10: Vereinfachter Aufbau eines GSM-Netzes

Die mobilen Endgeräte sind über die Funkschnittstelle (*Um-Interface*) mit den Basisstationen verbunden. Mehrere Basisstationen werden von einem Base Station Controller gesteuert. Über das Mobile Switching Center (MSC) werden die Daten entweder an das analoge Festnetz (Public Switched Telephone Network, PSTN) oder an das digitale ISDN-Netz weitergeleitet.

Der Zugriff auf die Funkschnittstelle erfolgt durch eine Kombination der Verfahren Time Division Multiplex Access und Frequency Division Multiplex Access (TDMA und FDMA). Auf jeder Trägerfrequenz werden 4,613 ms lange sich wiederholende Frames gesendet, die wiederum in 8 Timeslots unterteilt sind. Ein physikalischer Kanal wird dabei als ein bestimmter Timeslot innerhalb eines Frames definiert (siehe Abbildung 11).

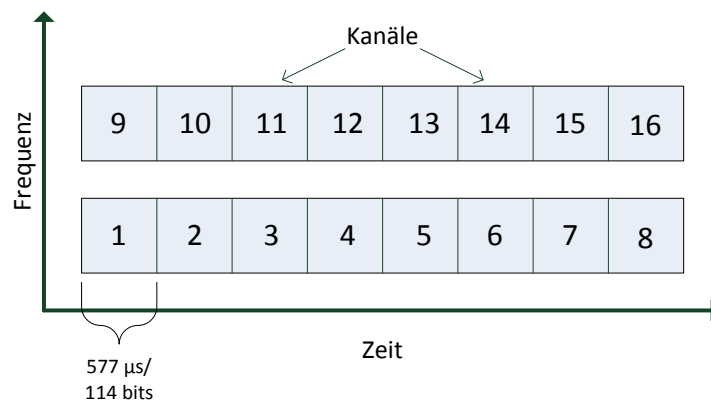


Abbildung 11: Aufteilung der GSM-Kanäle

Aus dieser Aufteilung ergibt sich eine Datenrate von 24,7 kbit/s pro Kanal. Nach Berücksichtigung von Synchronisierung und notwendigen Leerlaufzeiten, reduziert sich die auf der Luftschnittstelle zur Verfügung stehende Datenrate auf 22,8 kbit/s. Diese steht nicht komplett den Nutzdaten zur Verfügung, da ebenfalls Fehlerkorrektur- und Signalisierungsinformationen versendet werden. GSM definiert verschiedene logische Kanäle für Nutzdaten (traffic channels) mit einer Datenrate zwischen 2,4 kbit/s und 14,4 kbit/s. Eine wesentliche Eigenschaft von GSM ist, dass das mobile Endgerät eine feste Verbindung über die Basisstation und dem MSC bis hin zur Gegenstelle aufbaut. In dieser leitungsvermittelnden Datenübertragung (circuit-switched data, CSD) werden die Kanäle

exklusiv einer Verbindung zugeteilt. Auch wenn keine Nutzdaten versendet werden, können die Ressourcen nicht von anderen mobilen Teilnehmern genutzt werden.

3.2.1.1 General Packet Radio Service (GPRS)

Das Übertragungsverfahren CSD ist hauptsächlich für Sprachverbindungen gedacht, für die stoßweise Übertragung bei paketbasierten Datenverbindungen ist es weniger geeignet. Aus diesem Grund wurde der General Packet Radio Service (GPRS) als Erweiterung von GSM eingeführt, bei dem jedes Paket einzeln zwischen dem Mobilgerät und dem Mobilfunknetz übertragen wird. Dies führt zu einer wesentlich effizienteren Nutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite, da Ressourcen nur dann belegt werden, wenn auch Daten versendet werden müssen. Auf der Luftschnittstelle ist GPRS kompatibel zu GSM, netzseitig wurden neue Komponenten eingeführt. Die Architektur ist in Abbildung 12 gezeigt.

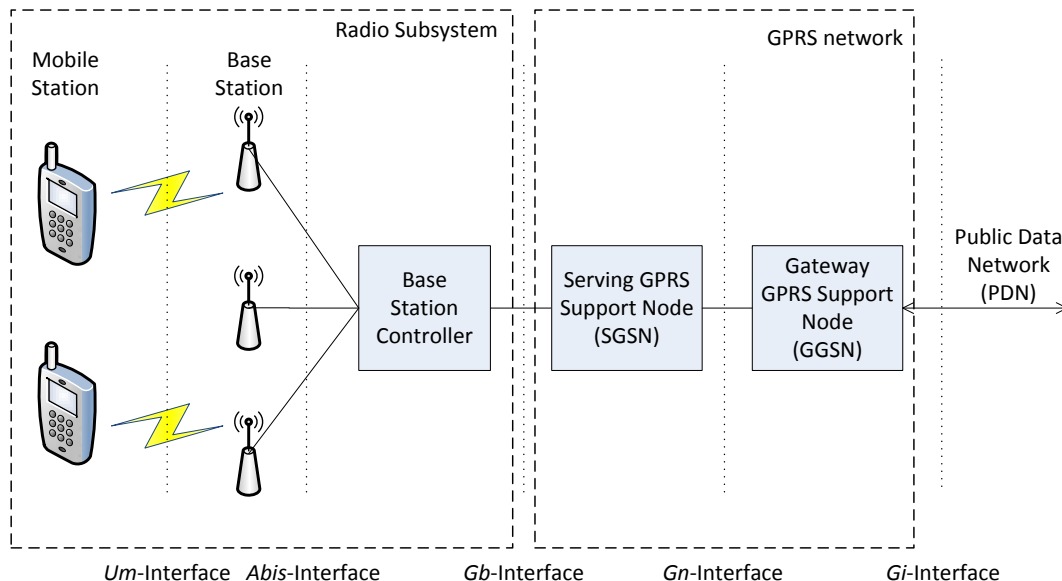


Abbildung 12: Vereinfachte Architektur des GPRS-Systems

Der Serving GPRS Support Node (SGSN) ist verantwortlich für das Mobilitätsmanagement der Mobilgeräte und die logische Verbindungskontrolle. Der Gateway GPRS Support Node (GGSN) verbindet das GPRS-Netz mit externen Netzwerken. Von außen eingehende Pakete werden vom GGSN an den SGSN getunnelt, in dem sich das entsprechende Mobilgerät zu dem Zeitpunkt aufhält.

Auf der Luftschnittstelle teilt sich GPRS die Ressourcen mit GSM, wobei die physikalische Übertragungsschicht, wie der Medienzugriff (CDMA/FDMA) und die Modulation, identisch sind. Allerdings erlaubt GPRS die sogenannte Multislot-Nutzung. Dabei kann ein Mobilgerät mehrere bzw. alle Timeslots eines Frames nutzen, während in GSM nur ein Timeslot pro Frame zur Verfügung steht. Wie viele Timeslots einem Mobilgerät zugeteilt werden, wird vom GPRS Netzwerk anhand verschiedener Parameter wie der Zellauslastung entschieden. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass sich GPRS die zur Verfügung stehenden Timeslots mit GSM teilen muss.

Weiterhin führt GPRS vier verschiedene Methoden zur Kanalcodierung ein, die aufgrund verschiedener Fehlerschutzverfahren unterschiedliche Datenraten ermöglichen. Die Klasse CS-1 bietet dabei den höchsten Fehlerschutz und die niedrigste Datenrate, in der Klasse CS-4 verhält es sich mit einer nicht vorhandenen Fehlerschutzcodierung umgekehrt. Die Art der Kanalcodierung wird auf Grundlage der Qualität der Funkverbindung gewählt, die unter anderem wesentlich von der Entfernung zwischen Mobilgerät und Basisstation abhängt. Tabelle 5 gibt einen Überblick, welche Datenraten sich aus den verschiedenen Kombinationen von Anzahl der genutzten Timeslots und der Kanalcodierung ergeben.

Tabelle 5: Mögliche Datenraten bei GPRS

Kodierungsschema	Datenrate bei der Nutzung von n Timeslots [kbit/s]			
	n=1	n=2	n=4	n=8
CS-1	9,05	18,1	36,2	72,4
CS-2	13,4	26,8	53,6	107,2
CS-3	15,6	31,2	62,4	124,8
CS-4	21,4	42,8	85,6	171,2

Mobilgeräte unterstützen in der Regel nicht die gleichzeitige Nutzung der maximal möglichen acht Upload- und Download-Timeslots. Die Anzahl der nutzbaren Timeslots wird durch die Definition von Multislot-Klassen angegeben. Eine Auswahl der möglichen Klassen wird in Tabelle 6 angegeben.

Tabelle 6: Multislot-Klassen bei GPRS

Multislot Klasse	Reservierte Downlink Timeslots	Reservierte Upload Timeslots	Gleichzeitig nutzbare Timeslots
1	1	1	2
2	2	1	3
3	2	2	3
4	3	1	4
5	2	2	4
6	3	2	4
7	3	3	4
8	4	1	5
12	4	4	5
32	5	3	6

Ein Mobilgerät einer bestimmten Multislot-Klasse muss dabei auch alle Timeslot-Kombinationen der unteren Klassen anbieten. Eine Internet-Recherche hat ergeben, dass aktuelle Smartphones meist die Klasse 12 unterstützen. Dies entspricht maximalen Up- und Download-Datenraten zwischen 36,2 und 85,6 kbit/s.

Die in GPRS verwendeten Protokolle führen aufgrund ihres Overheads dazu, dass für die Nutzdaten eine geringere Datenrate zur Verfügung steht. Abbildung 13 zeigt den GPRS Protokollstack, welcher in einer Mobilstation zur Übertragung der Nutzdaten verwendet wird, und den dazugehörigen Endpunkt des entsprechenden Protokolls im GPRS Netzwerk. Auf die Signalisierungsprotokolle sowie internen Protokolle des GPRS Kernnetzes wie das Base Station System GPRS Protocol (BSSGP) oder das GPRS Tunneling Protocol (GTP) wird hier nicht eingegangen.

Das Subnetwork-Dependent Convergence Protocol (SNDCP) ist das oberste GPRS-spezifische Protokoll und nimmt die einzelnen Pakete der GPRS-externen Netzwerkschicht (network layer protocol units, N-PDUs) entgegen. Die Pakete der Network Packet Data Units (N-PDUs) werden entsprechend der maximalen Paketdatenlänge des unteren Logical Link Control (LLC) Protokolls segmentiert. SNDCP kann gleichzeitig mehrere externe Protokolle wie X.25 oder IP multiplexen. Die Nutzdaten einer N-PDU oder auch der N-PDU Header selbst können von SNDCP komprimiert werden.

Das LLC-Protokoll stellt Methoden zur zuverlässigen Übertragung von Paketen zwischen Mobilstation und SGSN bereit und kann in seiner Funktionalität mit TCP verglichen werden. So fügt LLC den Paketen eine Checksumme hinzu, bestätigt korrekt empfangene Pakete

oder ordnet Pakete wieder in ihre korrekte Reihenfolge ein, wenn diese auf dem Übertragungsweg verloren gegangen sein sollte.

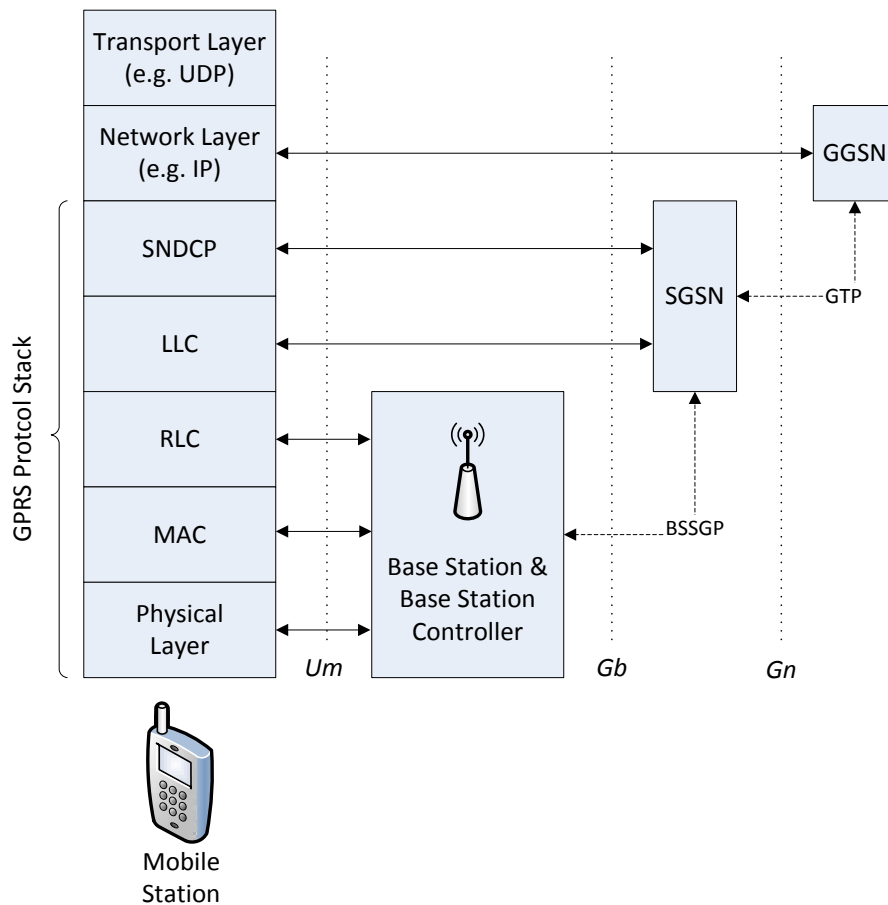


Abbildung 13: GPRS Protokollstack zur Übertragung von Nutzdaten

Die unterste Protokollebene wird von der Radio Link Control/Medium Access Control (RLC/MAC)-Schicht gebildet, die sich für den Datentransfer zwischen Mobilgerät und Basisstation verantwortlich zeichnet. So wird hier u.a. der Zugriff auf die Funkschnittstelle gesteuert. Das Mobilgerät fordert Ressourcen über einen zufälligen Zugriff nach dem slotted Aloha-Verfahren an. Anschließend werden die zu übertragenden Daten auf die vom GPRS-Netzwerk zugeteilten Zeitschlitzte verteilt.

Durch die verschiedenen GPRS Protokolle entsteht neben den TCP/IP-Nutzdaten ein zusätzlicher Overhead. In [1] wird gezeigt, dass dieser Overhead von der Länge der TCP/IP-Pakete abhängig ist. Bei einer Paketlänge von 10 Bytes beträgt der Overhead ca. 40 Bytes bzw. 400 %. Bei langen Paketen ab 1000 Bytes liegt der relative Overhead recht konstant bei 20 %.

GPRS definiert verschiedene Quality-Of-Service (QoS)-Klassen. Wenn ein Mobilgerät eine bestimmte Klasse anfordert, entscheidet der SGSN, ob diese oder eine niedrigere Klasse für die Verbindung gewährt werden kann. Es obliegt allerdings den Netzbetreibern, welche QoS-Klassen sie anbieten. Die Eigenschaften der Klassen Zuverlässigkeit, Verzögerung, Spitzendurchsatz und mittlerer Durchsatz sind in Tabelle 7 bis Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 7: Zuverlässigkeitsklassen bei GPRS

Zuverlässigkeits-klasse	Wahrscheinlichkeit für			
	Paketverlust	Paketduplikat	Falsche Paketreihenfolge	Korruptes Paket
1	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}
2	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-6}
3	10^{-2}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-2}

Tabelle 8: Verzögerungsklassen bei GPRS

Verzögerungs-klasse	Maximale Verzögerung [s]			
	Paketlänge 128 Byte		Paketlänge 1024 Byte	
	Mittlere Verzögerung	95% Verzögerung	Mittlere Verzögerung	95% Verzögerung
1	< 0,5	< 1,5	< 2	< 7
2	< 5	< 25	< 15	< 75
3	< 50	< 250	< 75	< 375
4 (Best effort)	nicht spezifiziert			

Tabelle 9: Spitzendurchsatzklassen bei GPRS

Spitzendurchsatz-Klasse	Spitzendurchsatz [kbit/s]
1	8
2	16
3	32
4	64
5	128
6	256
7	512
8	1024
9	2048

Tabelle 10: Durchschnittsdurchsatzklassen bei GPRS

Durchschnittsdurchsatz-Klasse	Durchschnittsdurchsatz
1	0,22 bit/s
2	0,44 bit/s
3	1,11 bit/s
4	2,2 bit/s
5	4,4 bit/s
6	11,1 bit/s
7	22 bit/s
...	...
31	Best effort

Die Durchsatzklassen enthalten bereits Definitionen für folgende Mobilfunkgenerationen, da die maximale Datenrate bei GPRS bei 171,2 kbit/s liegt.

3.2.1.2 Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)

Die Technik Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) ist eine Erweiterung von GPRS. Am Netzaufbau wurden dabei keine Änderungen vorgenommen, stattdessen wurde auf der Funkschnittstelle ein anderes Modulationsverfahren eingeführt. Bei GSM einschließlich GPRS wird das Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)-Verfahren verwendet, bei dem ein über die Funkschnittstelle übertragendes Symbol einem Bit entspricht.

Bei EDGE wird hingegen das 8-Phase Shift Keying (8-PSK)-Verfahren genutzt. Dabei wird der Phasenwinkel der Trägerfrequenz so moduliert, dass er eine von acht verschiedenen Zuständen annehmen kann. Jedem dieser acht möglichen Phasenwinkel ist eine bestimmte Kombination von drei Bits zugeordnet. Pro über Funk gesendetem Symbol können daher drei Bits übertragen werden. Da die Symboldauer bei EDGE und GPRS sich nicht unterscheidet, beträgt die theoretische Datenrate bei EDGE das Dreifache der GPRS-Rate. Zusätzlich wurde eine robustere Fehlerschutzcodierung eingeführt. Die verschiedenen Kodierungsschemata in EDGE werden in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Kodierungsschemata bei EDGE

Schema	Modulationsformat	Datenrate pro Slot (kByte/s)
MCS-1	GMSK	8,8
MCS-2	GMSK	11,2
MCS-3	GMSK	14,8
MCS-4	GMSK	17,6
MCS-5	8-PSK	22,4
MCS-6	8-PSK	29,6
MCS-7	8-PSK	44,8
MCS-8	8-PSK	54,4
MCS-9	8-PSK	59,2

3.2.2 Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)

Das Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) ist ein Mobilfunkstandard der dritten Generation. Es ist eine weitere Evolutionsstufe von GSM. So ist z.B. das UMTS-Kernnetz weitestgehend kompatibel mit GPRS. Es bietet auch die aus GSM und GPRS bekannten A- und Gb-Interfaces (siehe Abbildung 10 und Abbildung 12) an, um diese parallel zu einem UMTS-Netz zu betreiben. Eine neue Komponente ist das UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN).

Abbildung 14 zeigt die UMTS-Architektur mit Beschränkung auf die Netzelemente zur Sprach- und Nutzdatenkommunikation. Auf weitergehende Funktionen wie Benutzer-, Mobilitäts-, und Netzverwaltung wird hier nicht eingegangen.

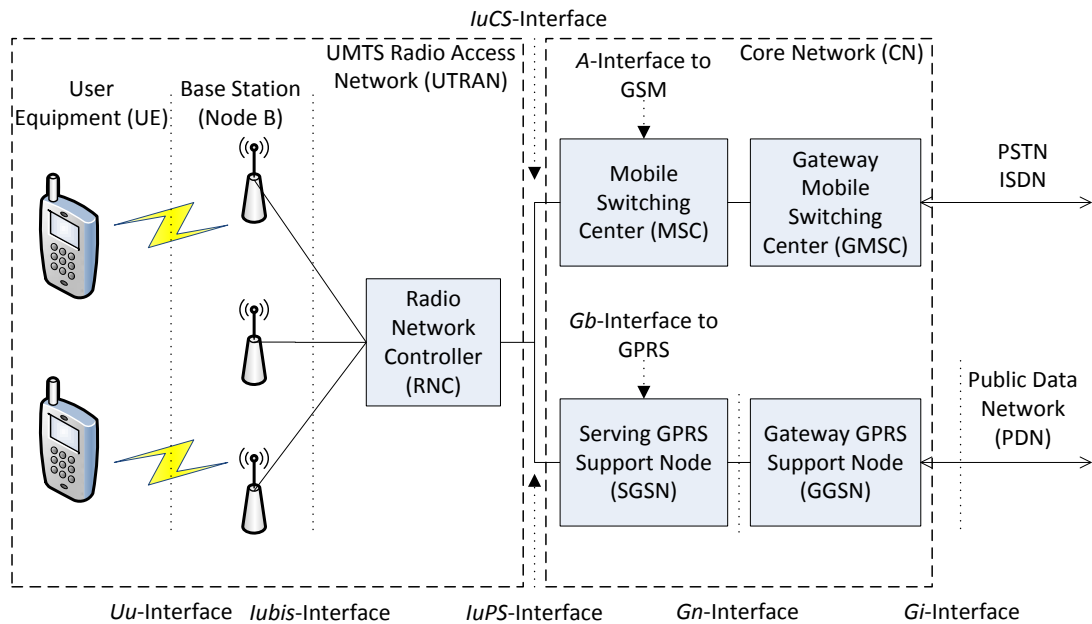


Abbildung 14: Vereinfachte UMTS-Netzarchitektur

Das UTRAN ist mit dem Kernnetz über das IuCS-Interface für leitungsvermittelte Daten und über das IuPS-Interface für Paketdaten verbunden. In der UMTS-Terminologie steht das User Equipment (UE) für das Mobilgerät und Node B für die Basisstation.

Das Zugriffsverfahren auf die Funkschnittstelle unterscheidet sich grundsätzlich von dem in GSM genutzten. Während bei GSM die physikalischen Kanäle durch periodische Zeitschlitzte einer bestimmten Frequenz gebildet werden, bietet UMTS zwei verschiedene Kanalzugriffsverfahren an. Grundlage beider Verfahren ist der Direct Sequence Code Division Multiple Access (DS-SS). Hier werden die zu übertragenden Daten mit einer bestimmten Codesequenz verknüpft. Ein Beispiel für diese Codierung ist in Abbildung 15 dargestellt.

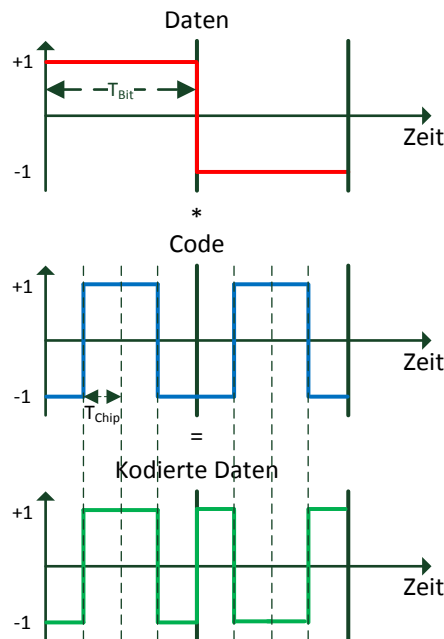


Abbildung 15: Beispiel für CDMA-Kodierung

Der Code besteht hier aus 4 Bits, wobei diese Bits Chips genannt werden. Ein Datenbit wird dann mit den einzelnen Chips des Codes multipliziert. Über den Funkkanal müssen dann in derselben Zeit statt eines Bits vier Chips übertragen werden, die Datenrate vervierfacht sich.

Vereinfacht gesagt führt nach dem Shannon-Hartley-Gesetz eine vervierfachte Datenrate bei gleichbleibender Übertragungszeit zu einer Vervielfachung der Bandbreite. Daher führt die CDMA-Kodierung zu einer Bandspreizung, bei der auch die Signalstärke reduziert ist. Abbildung 16 veranschaulicht die Spreizung im Frequenzbereich.

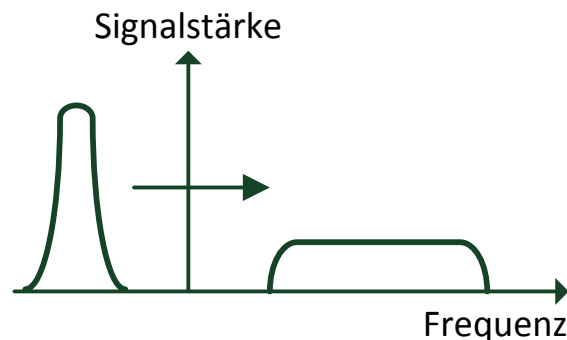


Abbildung 16: Bandspreizung bei CDMA

Bei CDMA senden mehrere Teilnehmer zur selben Zeit im selben Frequenzbereich, sodass sich ihre Signale überlappen. Alle Sender in einem Frequenzbereich müssen Spreizcodes verwenden, die untereinander bestimmten mathematischen Eigenschaften genügen (die verwendeten Codes müssen orthogonal zueinander sein). Dadurch wird es dem Empfänger ermöglicht, durch Verwendung des Spreizcodes des Senders, dessen Signal auszufiltern. Die anderen Sender lassen sich als Störsignal bzw. Rauschen auffassen. Nimmt die Anzahl der Teilnehmer in einer Zelle zu oder verschlechtern sich die Eigenschaften des Funkkanals, so steigt auch der Rauschpegel. Dies muss durch eine größere Spreizung ausgeglichen werden. Dazu wird der Spreizfaktor geändert, der definiert ist als die Anzahl der Chips pro Bit.

Zur Trennung von Down- und Uplink sind zwei verschiedene Verfahren spezifiziert: Frequency Division Duplex (FDD) und Time Division Duplex (TDD). Bei FDD sind für Up- und Downlink jeweils zwei 5 MHz breite Frequenzbereiche reserviert. Ein physikalischer Kanal innerhalb dieser Bereiche wird dabei durch den verwendeten Spreizcode charakterisiert. Die Kombination von FDD und CDMA wird auch Wideband-CDMA (W-DCMA), UMTS-FDD oder UMTS Terrestrial Radio Access FDD (UTRA-FDD) genannt und ist die weitverbreitetste UMTS Luftschnittstelle. Die Chiprate bei FDD ist festgelegt auf 3,84 Mchips/s, wobei jeder Chip mit QPSK (zwei Bits/Symbol) moduliert wird. Zur Anpassung an die Zellauslastung und die Qualität der Funkstrecke können variable Spreizfaktoren genutzt werden, aus denen mehrere mögliche Datenraten resultieren. Der Spreizfaktor wird durch ständige Messung des Funkkanals alle 10 ms angepasst. Tabelle 12 zeigt den Zusammenhang zwischen Spreizfaktor, Rohdatenrate und der Datenrate nach Einfügen der Fehlerschutzcodierung.

Tabelle 12: Datenraten bei UMTS

Spreizfaktor	Datenrate [kbit/s]	Datenrate nach Fehlerschutzcodierung [kbit/s]
256	15	nur für Sprachdaten
...		
16	240	120
8	480	240
4	960	480
4, mit 6 parallelen Codes	5740	2,8 Mbit/s

Da auf dem für die Datenübertragung genutzten Kanal (Dedicated Physical Data Channel: DPDCH) auch Signalisierungsinformationen übertragen werden, steht den Nutzdaten nicht die komplette Datenrate zur Verfügung. In der ersten UMTS-Fassung (UMTS Release 1999) ist ein maximaler Spreizfaktor von 4 vorgesehen, was zu einer maximalen Nutzdatenrate von 384 kbit/s führt. Spätere Releases erlauben auch die gleichzeitige Nutzung von mehreren Spreizcodes, womit sich die Nutzdatenrate auf 2 Mbit/s erhöht lässt.

Bei TDD arbeiten beide Senderrichtungen im selben Frequenzband. Für Up- und Downlink stehen bestimmte Zeitschlitzes zur Verfügung. Innerhalb eines Zeitschlitzes werden die physikalischen Kanäle wiederum durch ihren Spreizcode unterschieden. Diese Kombination wird auch als Time Division-CDMA (TD-CDMA) oder UTRA-TDD bezeichnet. Aufgrund der geringeren Verbreitung von TD-CDMA wird hier nicht weiter auf dieses Verfahren eingegangen.

Bei den in UMTS verwendeten Protokollen wird zwischen der User Plane und der Control Plane unterschieden. Letztere umfasst alle Protokolle zur Signalisierung, Netzzugriff, Anrufverwaltung usw. Die Nutzdaten werden in der User Plane übertragen. Deren Protokolle sind in Abbildung 17 gezeigt.

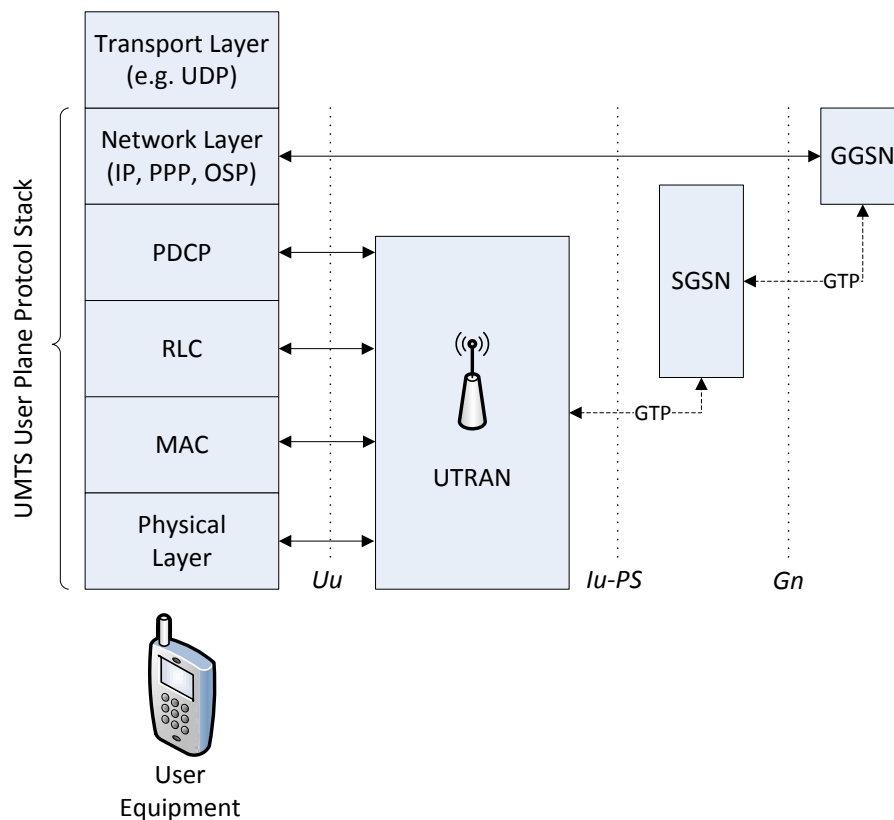


Abbildung 17: Protokolle in der UMTS User Plane

Das Packet Data Convergence Protocol (PDCP) bildet die Schnittstelle zum UMTS Protokollstapel. Es unterstützt die Netzwerkprotokolle IPv4, IPv6, PPP und OSP. PDCP ermöglicht eine Kompression der Pakete aus der Netzwerkschicht (packet data unit, PDU), außerdem ermöglicht es eine Pufferung und Neuordnung von Paketen.

Das Radio Link Control (RLC) Protokoll teilt die PDUs auf die verschiedenen von UMTS bereitgestellten logischen Datenkanäle auf und ermöglicht dabei die Berücksichtigung von QoS-Anforderungen. Weiterhin werden von RLC PDUs für den weiteren Transport segmentiert oder zusammengesetzt. Sollte die Anwendung es anfordern, bietet RLC Methoden zur Fehlerkorrektur und Flusskontrolle an.

Im Media Access Control Layer werden die logischen UMTS-Kanäle auf die physikalischen Übertragungskanäle abgebildet.

Der durch die Protokolle entstehende Overhead wird in [1] genauer untersucht. Es zeigt sich, dass ab PDU-Paketlängen von 1 kByte der relative Overhead recht konstant ist und je nach verwendeter Datenrate zwischen 1 % und 10 % liegt. Im Ergebnis ist der UMTS-Overhead um den Faktor ein Drittel bis zu ein Halb kleiner als bei GPRS.

Für QoS-Zwecke bietet UMTS sogenannte Bearer Services an. Ein Bearer Service definiert dabei Kapazitäten für den Datentransfer zwischen zwei Endpunkten innerhalb des UMTS-Netzes. Der End-to-End Service steht dabei für die Verbindung zwischen zwei Endgeräten auf Applikationsebene. Ein Beispiel ist eine Anwendung, die Daten zwischen einem Mobilgerät und einem an das Internet angeschlossenen PC austauscht. Der End-to-End Service definiert für diese Verbindung je nach Klassifikation des Datenverkehrs bestimmte Eigenschaften. Die UMTS festgelegten Datenverkehrsklassen sind:

- Konventionelle Klasse. Die Übertragungszeit ist gering, während die Verzögerungszeit groß sein kann. Die zeitliche Relation zwischen den Informationen muss erhalten bleiben. Die Sprachübertragung fällt in diese Klasse.
- Streaming Klasse: Die Variation der Übertragungszeit zwischen Informationspaketen in einer Übertragungsrichtung muss gering sein. Die Anforderungen an die Verzögerungszeit sind gering. Ein Beispiel sind Video-Streams.
- Interaktive Klasse: Hier sind die Anforderungen an die Integrität der übertragenden Daten besonders hoch. Die Daten werden meist in einem Anfrage-Antwort-Schema übertragen. Das Abrufen von Internetseiten stellt ein Beispiel da.
- Hintergrund Klasse: Hier steht alleine die Datenintegrität im Vordergrund. Zeitliche Anforderungen werden hier vernachlässigt. Das Abrufen von E-Mails im Hintergrund fällt in diese Klasse.

Je nach Datenverkehrsklasse können verschiedene Eigenschaften der Verbindung garantiert werden. Dies sind z.B. maximale Bitrate, garantierte Bitrate, Bitfehlerrate oder die Verzögerungszeit. Die genauen Spezifikationen legt der Netzbetreiber fest.

3.2.2.1 High Speed Packet Access (HSPA)

High Speed Packet Access (HSPA) ist eine Erweiterung des UMTS-Standards zur Erhöhung der Datenraten. HSPA wird unterteilt in High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) für Daten in Richtung Mobilgerät und High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) für die entgegengesetzte Richtung.

Bei HSDPA werden die Daten über den logischen High Speed Downlink Shared Channel (HS-DSCH) übertragen. Auf diesen Kanal wird von mehreren UEs parallel zugegriffen. Der Spreizfaktor dieses Kanals ist konstant und es werden 15 parallele Codes genutzt. Die Zuteilung der verwendeten Codes zu den UEs wird dynamisch vom Node B getroffen und alle 2 ms erneuert. Eine beispielhafte Verteilung der Codes auf 4 UEs ist in Abbildung 18 gezeigt.

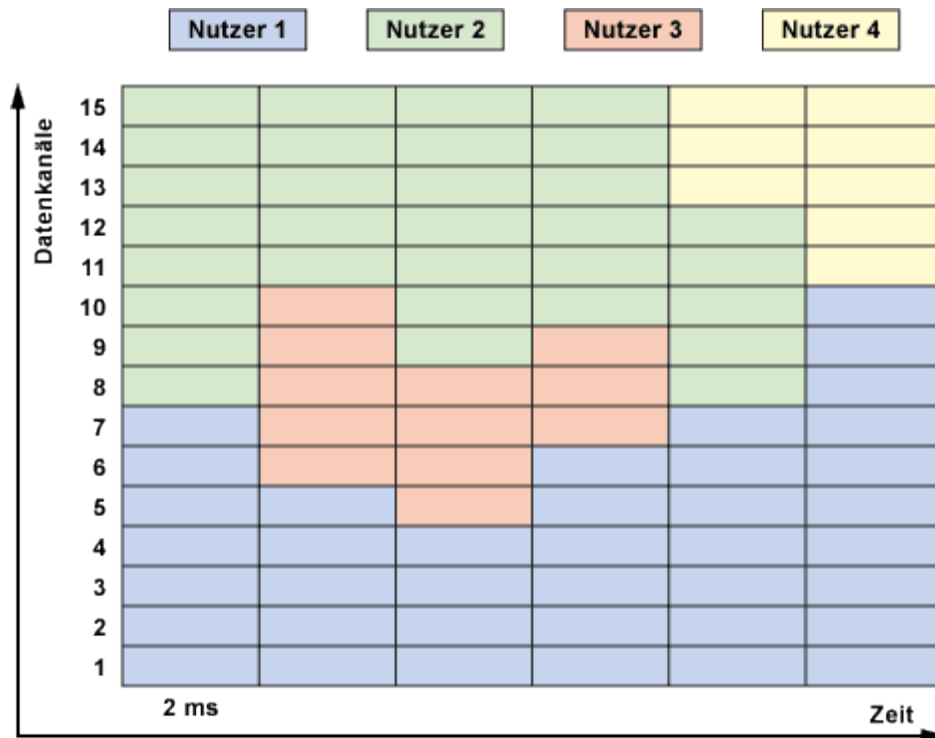


Abbildung 18: Aufteilung der Ressourcen des HS-DSCH bei HSDPA [8]

Das Zuteilungsverfahren berücksichtigt u.a. die Menge der zu versendenden Daten und die Qualität der Funkverbindung. So werden einem UE bei einer guten Verbindung mehr Codes zugeteilt, sodass auch mehr Daten innerhalb eines 2 ms-Zeitschlitzes übertragen werden können. Als Hintergrund dient die Tatsache, dass bei einer guten Verbindung weniger Bitfehler auftreten und so mehr gültige Pakete versendet werden können. Diese Priorisierung führt zu einer Erhöhung des Datendurchsatzes des Node B, weil die zur Verfügung stehenden Kapazitäten auf Teilnehmer mit einer guten Funkverbindung konzentriert werden, was wiederum insgesamt zu weniger fehlerhaft übertragenden Paketen führt. Gleichzeitig wird eine Mindestdatenrate auch für die Teilnehmer mit einer schlechter Verbindung garantiert.

Eine weitere Neuerung ist das Hybrid Automatic Repeat-Request (HARQ)-Verfahren. Wenn der Empfänger anhand des Fehlerschutzcodes ein ungültiges Paket erkennt, speichert er dieses Paket und fordert eine erneute Übermittlung an. Dabei wird das Paket mit einem anderen Fehlerschutzcode versehen. Durch die Kombination des ersten fehlerhaften Paketes mit der erneuten Aussendung erhöht sich beim Empfänger die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Decodierung – auch wenn das zweite Paket wiederum fehlerbehaftet war.

Wie auch bei der Erweiterung von GPRS zu EDGE wird bei HSDPA eine höherwertige Modulation eingeführt. Neben der bereits vorhandenen QPSK-Modulation (2 Bits/Symbol) wird eine Quadraturamplitudenmodulation (QAM) eingeführt. Ein Symbol wird dabei neben seinem Phasenwinkel auch durch seine Amplitude bestimmt. Die in HSDPA zusätzlich verwendbaren Modulationen ist 16-QAM (16 Symbole, d.h. vier Bits pro Symbol). Der Node B erhält von den UEs regelmäßig Messwerte über den Zustand der Funkverbindung. Erlauben diese Werte den Einsatz der QAM, kann der Node B für das entsprechende UE die Modulation umschalten. Abbildung 19 zeigt ein Beispiel der 16-QAM in der komplexen Zahlenebene. Jedes Symbol repräsentiert eine Folge von vier Bits und wird durch seinen Phasenwinkel und die Amplitude charakterisiert.

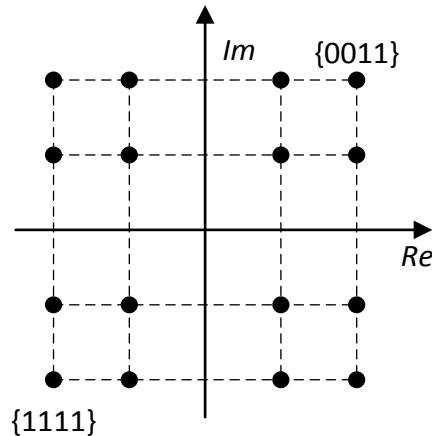


Abbildung 19: Symbole bei der 16-QAM

Mit dem HSDPA+ oder HSDPA Evolution genannten Erweiterungen werden weitere Verfahren zur Steigerung der Datenrate eingeführt. Bei der Dual-Cell-Technik wird sich zu Nutze gemacht, dass sich ein UE oft im überlappenden Empfangsgebiet von zwei verschiedenen Node Bs befindet. Die Datenströme werden dann auf beide Node Bs aufgeteilt. Damit erhalten vor allem UEs im Randbereich eines Node B einen Geschwindigkeitsvorteil. In späteren HSDPA-Standards wird diese Technik auf bis zu sechs Zellen ausgeweitet.

Ein weitere Neuerung ist die Einführung des Multiple Input-Multiple Output (MIMO)-Prinzips. Der Datenstrom wird dabei von mehreren (2 oder 4) räumlich getrennten Antennen gesendet bzw. empfangen. Im Idealfall, wenn der Empfänger die beiden Datenströme perfekt trennen kann, erhöht sich die Datenrate dabei um den Faktor 2.

Für gute Funkverbindungen kann 64-QAM (sechs Bits pro Symbol) als Modulation gewählt werden.

Damit nicht alle Endgeräte den kompletten Funktionsumfang von HSDPA implementieren müssen und zur Wahrung der Kompatibilität mit älteren Geräten, wurden für HSDPA bestimmte Kategorien definiert, von denen ein Auszug in Tabelle 13 gezeigt wird. Zusätzlich wird angegeben, mit welcher UMTS-Version (Release) die entsprechende Kategorie eingefügt wurde. Ab Release 7 spricht man von HSDPA+. Aktuelle Mobilgeräte (Samsung Galaxy S4, Apple iPhone 5) unterstützen die Kategorie 24.

Tabelle 13: HSDPA-Kategorien (Auszug)

Kategorie	Release	Anzahl an HS-DSCH Codes	Modulation	Erweiterungen	Maximale Datenrate [Mbits/s]
1	5	5	16-QAM		1,2
5	5	5	16-QAM		3,6
10	5	15	16-QAM		14,0
12	5	5	QPSK		1,8
13	7	15	64-QAM		17,6
20	8	15	64-QAM	MIMO	42,2
24	8	15	64-QAM	Dual-Cell	42,2
38	11	15	64-QAM	Quad-Cell, MIMO 4	337,5

Für den Uplink vom UE zum Node B wurde HSUPA eingeführt. Während beim Downlink ein Sender (Node B) über einen gemeinsamen Kanal eine gesamte Zelle versorgt, gibt es beim

Uplink mehrere Sender (UEs), deren Daten auf getrennten Kanälen (Enhanced Dedicated Channel, E-DCH) gesendet werden. Hier erfolgt die Anpassung der Datenrate über den Spreizcode. Techniken wie HARQ werden auch bei HSUPA genutzt. Zeigt die verschiedenen HSUPA-Kategorien, die entsprechenden Releases und die Datenraten. Aktuell wird von Mobilgeräten wie Samsung Galaxy S4 oder Apple iPhone 5 die Kategorie 6 unterstützt.

Tabelle 14: HSUPA-Kategorien

Kategorie	Release	Minimaler Spreizfaktor	Modulation	Erweiterungen	Maximale Datenrate [Mbits/s]
1	6	4	QPSK		0,73
2	6	4	QPSK		1,46
3	6	4	QPSK		1,46
4	6	2	QPSK		2,93
5	6	2	QPSK		2,00
6	6	2	QPSK		5,76
7	7	2	QPSK, 16-QAM		11,5
8	8	2	QPSK		11,5
9	9	2	QPSK, 16-QAM		22,9
10	11	2	QPSK, 16-QAM, 64-QAM		22,9
11	11	2	QPSK, 16-QAM	MIMO	22,9
12	11	2	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	MIMO	34,5

3.2.3 Long Term Evolution (LTE)

Long Term Evolution (LTE) ist eine Weiterentwicklung von GSM und UMTS. Es führt neue Techniken zur effizienteren Nutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite ein, wobei die Funkschnittstelle nicht kompatibel zur den vorhergehenden Standards ist. Die Datenvermittlung in LTE ist komplett paketorientiert und basiert auf IP. Die LTE-Netzkomponenten für die Nutzdatenübertragung sind in Abbildung 20 dargestellt.

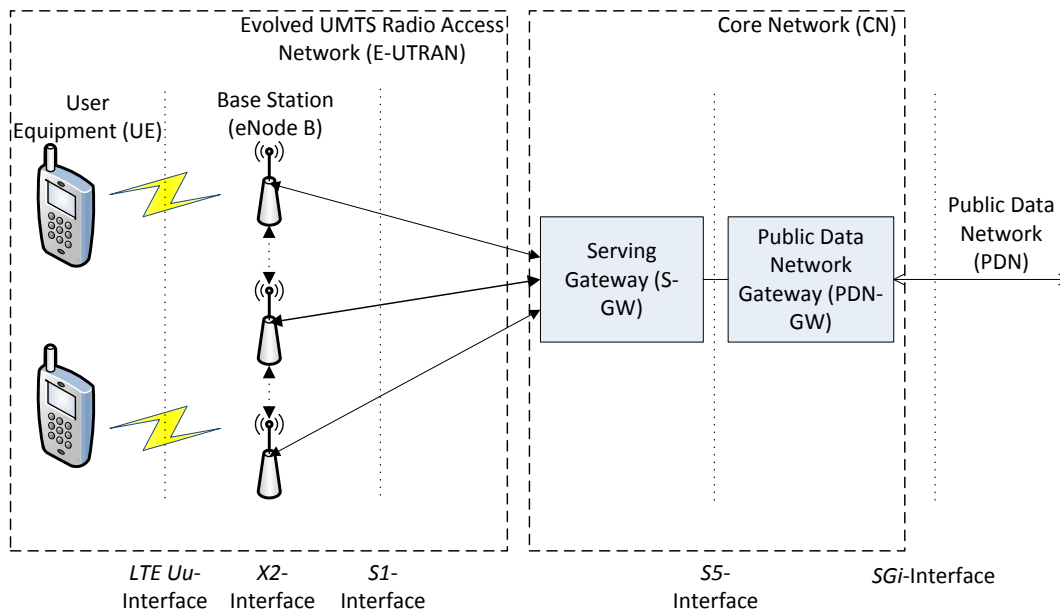


Abbildung 20: Vereinfachte Architektur eines LTE-Netzes

Die Architektur eines LTE-Netzes ist gegenüber GSM oder UMTS deutlich vereinfacht. So fehlt hier ein Radio Network Controller, dessen Aufgaben wie User- und Mobilitätsmanagement werden stattdessen von den Basisstationen (evolved Node B, eNode B) übernommen. Für Mobilitätsfunktionen wie Handover müssen die eNode Bs in LTE direkt miteinander kommunizieren, dazu wurde das X2-Interface eingeführt. Die Einsparung von Netzwerkkomponenten soll u.a. zu einer Reduzierung der Verzögerungszeiten im Datentransfer führen. Die verwendeten Protokolle auf den einzelnen Interfaces werden in Abbildung 21 dargestellt.

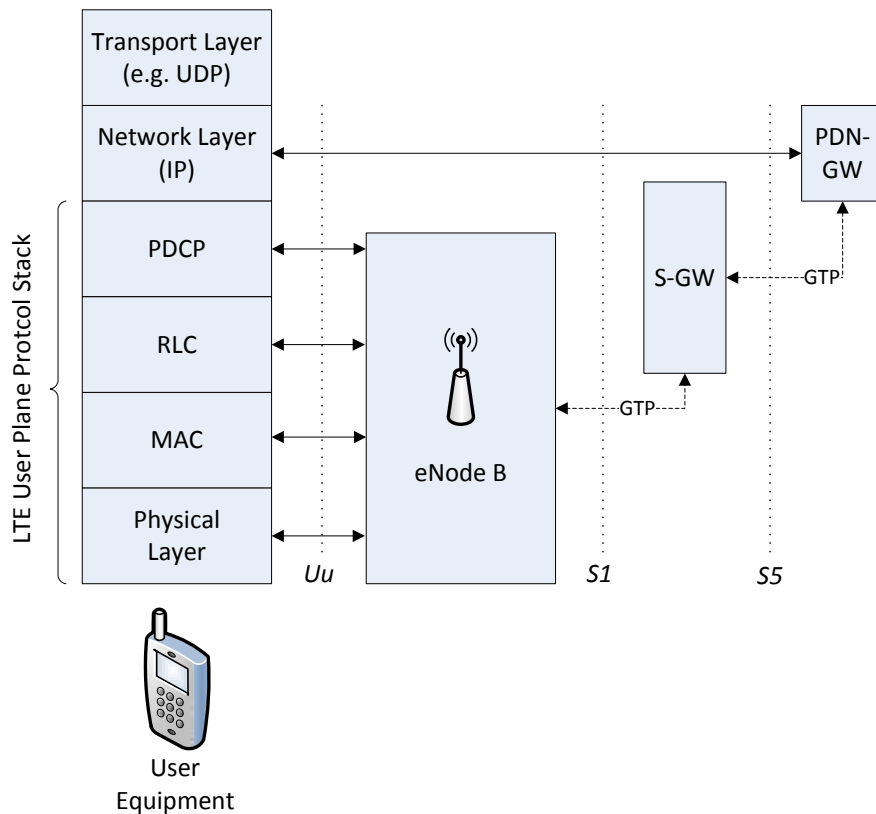


Abbildung 21: LTE User Plane Protokollstack

Der Aufbau der User Plane LTE Protokollstacks ist auf dem Uu-Interface weitestgehend identisch mit dem UMTS-Stack, wobei die Aufgaben und Funktionen der einzelnen Schichten –insbesondere im Hinblick auf den Funkzugriff– sich durchaus unterscheiden.

Das PDCP und die RLC-Layer erfüllen hier größtenteils die gleichen Aufgaben wie in UMTS.

Das MAC-Layer fasst die logischen Kanäle der höheren Schichten zu Transportkanälen zusammen. Hier wird auch der Zugriff auf die Funkschnittstelle koordiniert. Dazu muss der eNode B dem UE Ressourcen zuteilen, die vom MAC-Layer angefordert werden. Der Abstimmungsprozess erfolgt über den Random Access Channel (RACH) und wurde im Gegensatz zu UMTS optimiert, sodass bereitstehende Pakete schneller versendet werden können. Bei fehlerhaft übertragenden Paketen wird das aus HSDPA+ bekannte HARQ-Verfahren eingesetzt.

Das PHY-Layer setzt die Transportkanäle auf die physikalischen Kanäle um. Der Zugriff auf die Funkschnittstelle erfolgt beim Downlink über das Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)-Verfahren, welches eine Kombination des Verfahren Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) mit FDMA und TDMA darstellt.

Bei OFDM wird die zur Verfügung stehende Bandbreite auf mehrere schmalbandigere Trägerfrequenzen (Subträger) aufgeteilt. Durch die Orthogonalisierung der Subträger wird sichergestellt, dass diese Untereinander keine Interferenzen erzeugen. Der zu sendende Bitstrom wird ebenso auf mehrere parallele Bitströme mit entsprechend niedrigeren Datenraten aufgeteilt. Anschließend werden die Subträger mit jeweils einem der Bitströme moduliert. Als Modulationsverfahren kommen QPSK, 16-QAM und 64-QAM zum Einsatz. Die Verwendung von mehreren Subträgern mit kleinerer Bandbreite und entsprechend längerer Symboldauer macht OFDM resistenter gegen schmalbandige Störer und Interferenzen, die aus Mehrwegeempfang resultieren.

Als Mehrfachzugriffsverfahren wird bei LTE TDMA und FDMA eingesetzt. Jedem Teilnehmer wird dabei ein sogenannter Resource Block zugeteilt. Ein Block besteht aus 12 Subträgern zu je 15 kHz mit einer Dauer von 0,5 ms. Diese Aufteilung wird in Abbildung 22 dargestellt.

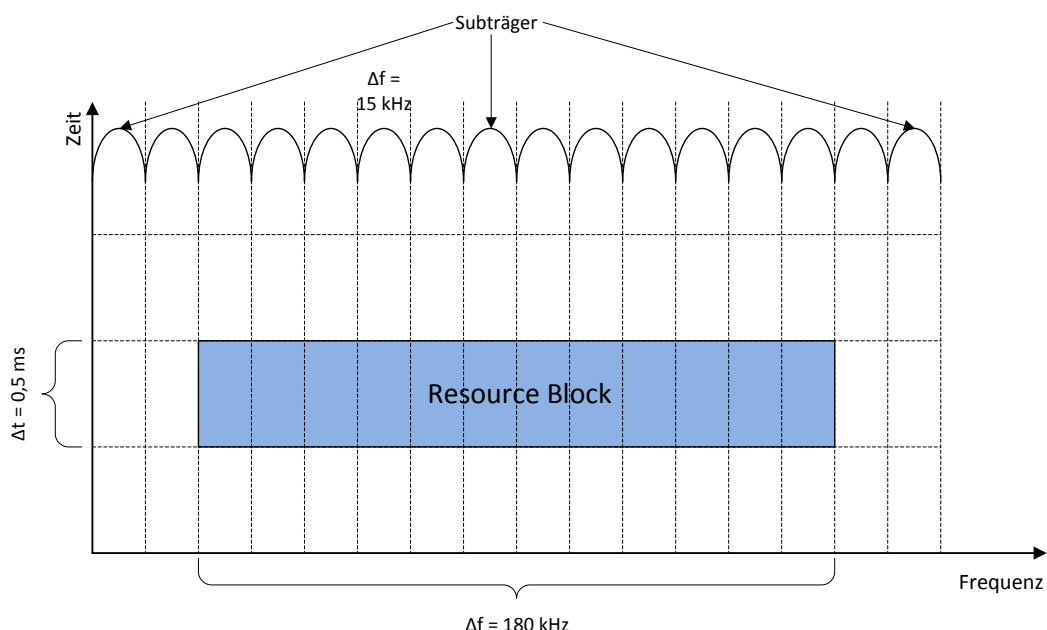


Abbildung 22: LTE Resource Block

Die Zuteilung der Resource Blocks auf die einzelnen UEs (Scheduling) wird vom eNode B vorgenommen. Je mehr Bandbreite einem LTE-Netz zur Verfügung steht, desto mehr Resource Blocks können zugeteilt werden, was zu einem erhöhten Datendurchsatz führt. Die

in LTE möglichen Datenrate sind nach den definierten Kategorien getrennt in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15: Maximale Datenraten bei LTE (Bandbreite 20 MHz)

Kat.	Modulation (DL/UL)	MIMO	Max. Datenrate Downlink (Mbit/s)	Max. Datenrate Uplink (Mbit/s)
1	QPSK, 16-QAM, 64-QAM / QPSK, 16-QAM	-	10	5
2	QPSK, 16-QAM, 64-QAM / QPSK, 16-QAM	2x2	50	25
3	QPSK, 16-QAM, 64-QAM / QPSK, 16-QAM	2x2	100	50
4	QPSK, 16-QAM, 64-QAM / QPSK, 16-QAM	2x2	150	50
5	QPSK, 16-QAM, 64-QAM / QPSK, 16-QAM, 64-QAM	4x4	300	75

Um QoS-Dienste zur Verfügung zu stellen, kommen Evolved Packet System (EPS) Bearer zur Anwendung. Dabei handelt es sich um eine virtuelle Punkt-zu-Punkt Verbindung zwischen dem UE und dem PDN-GW. Für diese Verbindung können QoS-Klassen definiert werden, die bestimmte Mindesteigenschaften garantieren. Unterhalb des EPS Bearers muss das LTE Netzwerk sicherstellen, dass die geforderten Eigenschaften auf allen physikalischen Schnittstellen (Uu , $S1$, $S5$) eingehalten werden können. Die kritischste Stelle ist dabei meistens die Funkschnittstelle, hier muss der eNode B beim Scheduling der Pakete die unterschiedlichen QoS-Anforderungen berücksichtigen bzw. dem UE mitteilen, dass die gewünschte QoS-Klasse nicht zur Verfügung steht. Eine Übersicht der QoS class identifier (QCI) ist in Tabelle 16 gegeben. In den ersten vier Klassen wird dabei dem EPS bearer eine garantierte Mindestbitrate (guaranteed bit rate, GBR) zugewiesen. In der Regel wird jedem UEs ein bestimmter QCI zugewiesen. Ob das UE davon abweichend einen anderen QCI wählen kann, ist vom Netzbetreiber abhängig.

Tabelle 16: QoS-Klassen in LTE

QCI	Bearer Typ	Priorität	Max. Paket-verzögerung [ms]	Max. Paket-verlust	Beispiel
1	GBR	2	100	10^{-2}	VoIP
2		4	150	10^{-3}	Videoanruf
3		3	50		Echtzeit-Spiele
4		5	300	10^{-6}	Videostreaming
5	Non-GBR	1	100		LTE-Signalisierung
6		6	300		TCP-basierte Dienste (E-Mail, FTP, ...)
7		7	100	10^{-3}	Interaktive Spiele
8		8	300	10^{-6}	TCP-basierte Dienste (E-Mail, FTP, ...)
9		9			

3.2.4 Erreichbarkeit von Mobilgeräten

Wenn mobile Geräte über das Mobilfunknetz mit dem Internet kommunizieren, wird im Regelfall die Verbindung vom Mobilgerät aus aufgebaut (Mobile Originated Data, MOD). Dabei verbindet sich das Mobilgerät mit dem Internet-Gateway des Mobilfunkanbieters (GGSN bzw. PDN-GW). Das Gateway wird dabei mit dem Access Point Name (APN)

adressiert. Im Folgenden wird der technologieunabhängige –wenn auch nicht ganz korrekte– Ausdruck APN für das Gateway benutzt.

Bei M2M-Anwendungen muss der Verbindungsaufbau allerdings oft aus der anderen Richtung initiiert werden (Mobile Terminated Data, MTD). Dort muss z.B. die Leitwarte eine Verbindung mit einer mobil angeschlossenen Außenstelle herstellen. Diese Richtung des Verbindungsaufbaus ist in der Regel nicht möglich. Entweder weist der APN den Mobilgeräten private IP-Adressen zu (z.B. Telekom) oder die Endgeräte erhalten öffentliche IP-Adressen, wobei der Zugriff aus dem Internet auf das Mobilgerät durch eine Firewall des Netzbetreibers geblockt wird (z.B. Vodafone).

Um diese Problematik zu umgehen, bieten einige Mobilfunkanbieter spezielle Lösungen an. Diese nennt sich bei Vodafone Corporate Data Access (CDA) und lässt sich in zwei Arten realisieren. Abbildung 23 zeigt mit dem Secure Corporate Access die erste Möglichkeit.

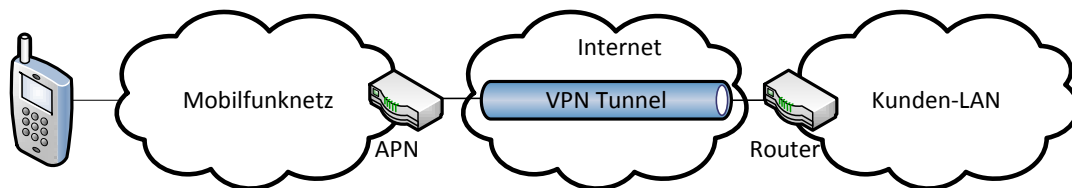


Abbildung 23: Vodafone Secure Data Access

Der Kunde beantragt hier bei Vodafone die Einrichtung eines CDA-Accounts. Anschließend kann er zwischen dem Kunden-Router und einem speziellen Vodafone-APN einen VPN-Tunnel einrichten. Dieser APN wird auch bei allen teilnehmenden Mobilgeräten eingerichtet. Deren Authentifizierung erfolgt über Benutzername, Passwort und optional durch die der SIM zugeordnete Rufnummer. Durch den VPN-Tunnel werden die Mobilgeräte auf IP-Ebene ein Teil des Kunden-LANs. Jeglicher Datenverkehr vom und zum Endgerät wird über den Tunnel zwischen APN und Kunden-Router ausgetauscht.

Beim Secure Internet Access, der in Abbildung 24 dargestellt ist, stellt der APN eine direkte Verbindung zum Internet her. Dabei sind die Mobilgeräte mit ihrer IP ohne Einschränkungen wie Network Address Translation (NAT) aus dem Internet erreichbar. Vodafone rät von dieser Lösung aus Sicherheitsgründen ab. Wenn keine weiteren Vorkehrungen getroffen werden, kann z.B. durch Port-Scans oder zufällige Anfragen an das Mobilgerät ein hoher Datenverkehr entstehen, der dem Kunden angerechnet wird. Der Kunde muss gegenüber Vodafone begründen, warum die VPN-Lösung keine Option für ihn darstellt.

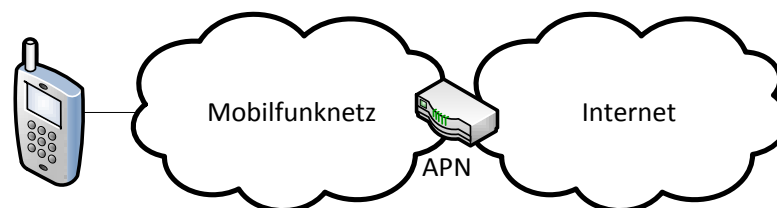


Abbildung 24: Vodafone Secure Internet Access

Die Telekom bietet eine dem Vodafone SDA sehr ähnliche Lösung an, ihr Angebot nennt sich Mobile IP VPN. Von E-Plus oder O₂ sind keine vergleichbaren Produkte bekannt.

3.3 Anwendungsanalyse

Die Anforderungsanalyse erfolgte aus einer Vielzahl an Einsatzfällen, welche durch die Firmen des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt wurden. Als typische Einsatzfälle von M2M-Anwendungen sind die Fernwirkung, Fernwartung, und Fernüberwachung (Diagnose und Monitoring) zu nennen. Der Einsatzbereiche dieser Anwendungen reicht dabei von Anlagen mit regionaler Ausbreitung bis hin zu landesweit und weltweit verbreiteten Anlagen.

Die M2M-Anwendungen kommen dabei hauptsächlich in Bereichen der Energieversorgung zum Einsatz. Mithilfe der M2M-Anwendungen werden z.B.:

- Steuern von Trafostationen im Großstadtumfeld und im ländlichen Bereich
- Diagnose und Fernwartung von Kleinwindkraftanlagen und Biogasanalgen
- Smart Grid
- Automatischen Erfassung von Zählerständen (Strom-, Gasmengen-, Wasser- und Heizkostenzähler)

Bei allen Anwendungsfällen sind eine Vielzahl von Datenendpunkten (DEP) mit einem oder zwei zentralen Datenintegrationspunkten verbunden. Die DEP bestehen dabei aus einem Router als Zugang zur Netzzugangstechnologie in Kombination mit einer Steuerung und Sensoren und Aktoren. Die DEP sind per drahtloser Netzzugangstechnologie mit dem Internet und dem zentralen DIP verbunden. Der zentralen Datenintegrationspunkte (z.B.: Leitwarte) wird wegen der Forderung nach einer hohen Verfügbarkeit des Gesamtsystems meist redundant ausgeführt und der DIP ist per drahtgebundener Netzzugangstechnologie mit dem Internet verbunden.

In Tabelle 17 ist eine Klassifizierung der Anwendungsfälle aufgelistet. In dieser Klassifizierung finden sich die wichtigsten Kenngrößen aus der Einsatzfallsammlung zu den Anwendungsfällen Fernwirkung, Fernwartung und Fernüberwachung.

Tabelle 17: Klassifizierung der Anwendungsfälle

	Fernwirkung	Fernwartung	Fernüberwachung
Anzahl an DIP	1 – 2	1 – 2	1 – 2
Netzzugangs-technologie DIP	drahtgebunden	drahtgebunden	drahtgebunden
Anzahl an DEP	50 - 5000	50 – 5000	50 – 5000
Netzzugangs-technologie DEP	drahtlos	drahtlos	drahtlos
Einsatzbereich	regional – weltweit	regional – weltweit	regional – weltweit
Anwendungsstatus	Normalbetrieb Inbetriebsetzung Diagnose	Normalbetrieb Inbetriebsetzung Diagnose	Normalbetrieb Inbetriebsetzung Diagnose
Initiierung der Datenübertragung	I: Zyklisch II: Ereignisgesteuert	I: Zyklisch II: Ereignisgesteuert	I: Zyklisch II: Ereignisgesteuert
Nutzdatenlänge	I: 50 – 256 Oktett II: 500 Oktett III: 5000 Oktett IV: 1000 Oktett V: 1.000.000 Oktett	I: 50 – 256 Oktett II: 500 Oktett III: 5000 Oktett IV: 1000 Oktett V: 1.000.000 Oktett	I: 50 – 256 Oktett II: 500 Oktett III: 5000 Oktett IV: 1000 Oktett V: 1.000.000 Oktett
Anwendungszyklus	1 – 50 s	1 h	15 Minuten bis 24 Stunden

4 Mess- und Auswertesystems

4.1 Anforderungen an das Mess- und Auswertesystem

Die Anforderungen an das Mess- und Auswertesystem liegen insbesondere auf der zuverlässigen Erfassung und Speicherung von Datensätzen aus den Messkampagnen. Vorhandene Werkzeuge, Softwarekomponenten und Messsonden werden auf ihre Eignung hin untersucht. Des Weiteren fließen die Gerätebeschaffungen für den mobilen Labormessplatz zur Leistungsuntersuchung an M2M-Verbindungen und das Messmodul für Langzeitmessungen mit dem Anritsu-Analyser ein. Für die Netzzugangstechnologien sollen industrieeübliche Modems eingesetzt werden, die über entsprechende Schnittstellen verfügen. Hierzu werden Komponenten von den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschuss genutzt. Für die statistische Auswertung wird auf das vorhandene Softwaretools R zurückgegriffen. Das implementierte Messsystem und die Auswertung mit Statistiksoftwarepaketen werden in einem Pilotlauf verifiziert und validiert.

4.2 Definition von Kenngrößen

4.2.1 Übertragungszeit (Transmission Time)

4.2.1.1 Definition

Die Übertragungszeit ist eine grundlegende Kenngröße, die zur Bewertung von Verfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit einer M2M-Lösung herangezogen werden kann. Dabei ist von Interesse, wie lange die Übertragung eines Nutzdatums vom Producer bis zum Consumer dauert. Ein einheitliches Verständnis dieser Zeitspanne erfordert die genaue Festlegung des Starts der Messung und deren Ende. Gemäß [16] und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist die Übertragungszeit der Zeitabschnitt von der Übergabe des ersten atomaren Bestandteils der Nutzdaten (Bit, Oktet) an der Schnittstelle zwischen Anwendung und M2M-Kommunikation eines Producers und der Übergabe des letzten atomaren Bestandteils derselben Nutzdaten an der Schnittstelle zwischen M2M-Kommunikation und Anwendung eines Consumers (siehe Abbildung 25). Die Art der Schnittstelle zwischen M2M-Kommunikation und Anwendung sowie deren Charakteristik ist bei der Veröffentlichung der Kenngrößenwerte immer mit anzugeben, da es keine einheitliche Anwendungsschnittstelle gibt.

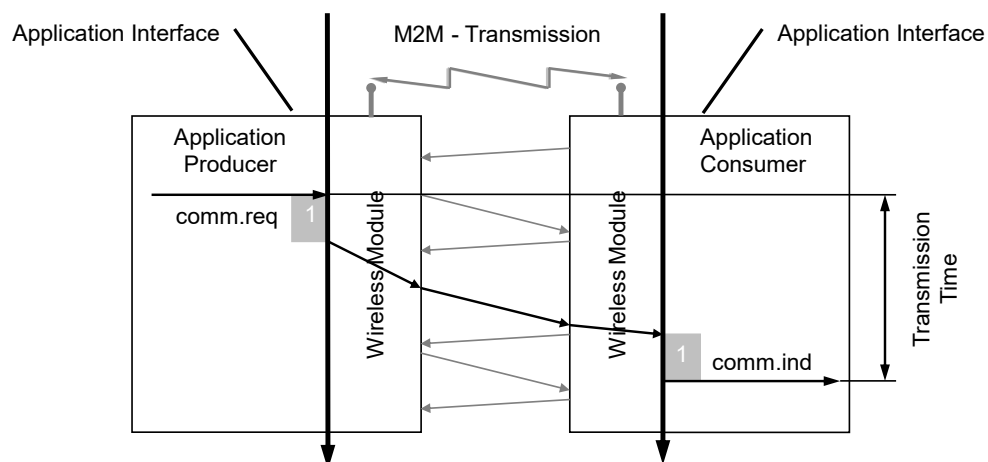


Abbildung 25: Definition der Latenzzeit

4.2.1.2 Statistische Parameter

Minimale Übertragungszeit

Die minimale Übertragungszeit (Min.) zwischen zwei Messpunkt ist durch die Ausbreitungsverzögerung des elektrischen und elektromagnetischen Signals entlang des Übertragungspfad gekennzeichnet. Dabei kann die minimale Übertragungszeit zwischen zwei Messpunkten als Konstante betrachtet werden, welche nicht unterschritten werden

kann. Die minimale Übertragungszeit ändert sich nur, wenn sich der Übertragungspfad zwischen den Messpunkten ändert oder bei Änderungen der Netzauslastung.

Modalwert

Der Modalwert (Mod.) der Übertragungszeit ist ein Lagemaß und existiert immer. Der Modalwert der diskreten Zufallsvariable Übertragungszeit ist die Ausprägung mit der größten Wahrscheinlichkeit.

Perzentilwert

Mit dem Perzentile wird die Häufigkeitsverteilung der Übertragungszeitwerte in Bereich mit 1 % zerlegt. Die angegebenen Perzentilwerte P90, P95, P99 haben dabei folgende Bedeutung:

- unterhalb des Perzentilwertes P90 liegen 90 % der ermittelten Übertragungszeitwerte.
- unterhalb des Perzentilwertes P95 liegen 95 % der ermittelten Übertragungszeitwerte.
- unterhalb des Perzentilwertes P99 liegen 99 % der ermittelten Übertragungszeitwerte.

Maximalwert

Der Maximalwert (Max.) der Übertragungszeit ist der aus der Stichprobe ermittelte maximale Wert. Es ist aber nicht sicher, dass es der absolute Maximalwert ist.

Spannweite

Die Spannweite (Span.) der Übertragungszeit ist die Differenz aus Maximalwert und Minimalwert der Übertragungszeitwert und ist ein Maß für den Jitter der Übertragungszeit.

4.2.2 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_{TTi} eines empfangenen Paketes berücksichtigt.

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

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.

4.2.3 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_{TTi} über einem definierten Maximalwert t_{TTmax} liegt. Des Weiteren wird bei

Paketvertauschungen das verspätete Paket als Verlust gewertet, selbst wenn es den Maximalwert $t_{TT\max}$ nicht überschritten hat.

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

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

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

4.2.4 Paketverlustrate

Die Paketverlustrate (PLR) zur Bewertung eines Kommunikationssystems kann wie folgt ermittelt werden:

$$PLR = \frac{N_{PL}}{N_{TX}} = \frac{N_{TX} - N_{Rx}}{N_{TX}} \quad (3)$$

4.3 Funktionsstruktur

Die Hauptbestandteile der funktionellen Teststruktur sind die zu testende Netzzugangstechnologie (System Under Test - SUT) und das ausführende Testsystem. Das ausführende Testsystem ist in Abbildung 26 rot und die zu testende Netzzugangstechnologie ist blau dargestellt. Das Testsystem beinhaltet drei Funktionen, die Emulation der Testanwendung mit den Bestandteilen des Daten-Integrations-Punkt (DIP) und Daten-End-Punkt (DEP). Zudem stellt das Testsystem eine Referenzschnittstelle für den WAN-Router auf der Seite des DEP und eine Referenz-Netzzugangstechnologie auf der Seite des DIP zur Verfügung. Die zu testenden Netzzugangstechnologie beinhaltet den zu testenden WAN-Router, welcher eine bestimmte Netzzugangstechnologie unterstützt. Je nach zu ermittelnder Kenngröße kann das SUT den Endpunkten in einem Producer-Consumer-Model oder Client-Server-Model zugeordnet werden. Die Testanwendung generiert Testdaten (Nutzdaten), die an das SUT zur Übertragung übergeben werden.

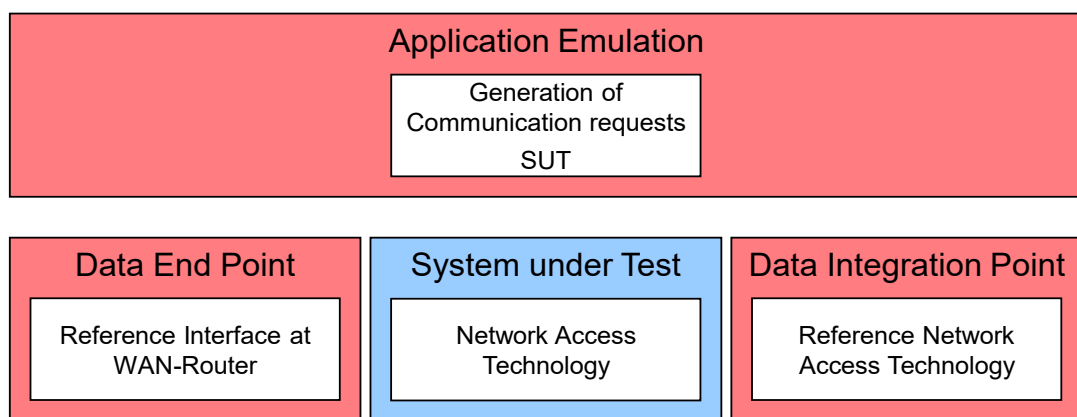


Abbildung 26: Funktionelle Teststruktur

4.4 Hardwareaufbau

4.4.1 Einleitung

Für das Mess- und Auswertesystem wurden drei verschiedene Konzepte des Hardwareaufbaues analysiert und validiert. Zu diesen Konzepten zählt das Anritsu Analyser

Konzept, das Konzept des mobilen Labormessplatzes und das Embedded Plattform Konzept. Die Notwendigkeit der Betrachtung von verschiedenen Konzepten wurde notwendig, da sich während der Projektbearbeitung weitere Anforderungen an das Mess- und Auswertesystem von Seiten des projektbegleiteten Ausschusses herauskristallisierten. Im Folgenden werden die einzelnen Konzepte vorgestellt und abschließen erfolgt eine Bewertung der einzelnen Konzepte.

4.4.2 Anritsu Analyser

4.4.2.1 Konzeptbeschreibung

Der zentrale Bestandteil des Konzeptes Anritsu-Analyser ist der Data Quality Analyzer „MD1230B“ der Firma Anritsu. Dabei handelt es sich um ein Messgerät, welches für die drahtgebundene Performanceanalyse von Ethernet/IP Netzwerken und der allgemeinen Überwachung dieser Netzwerke eingesetzt wird. Dazu zählen unter anderem die Prüfung von IP-fähigen Netzwerkgeräten und der QoS-Parameter innerhalb eines Netzwerkes. Zudem ist die Ermittlung und Analyse von Kenngrößen gemäß Kapitel 4.2 möglich. In Abbildung 27 ist der verwendete Data Quality Analyzer MD1230B abgebildet.

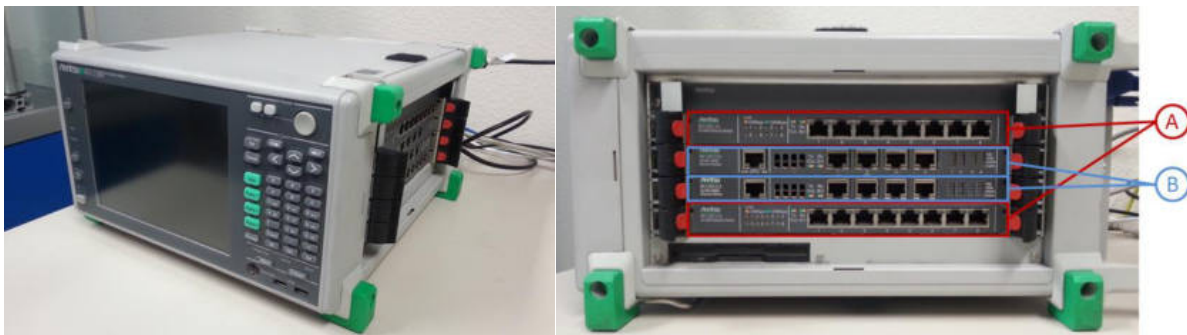


Abbildung 27 : Data Quality Analyzer MD1230B von Anritsu

Seitlich des Gerätes befinden sich Einschübe für das Integrieren von zusätzlichen Messmodulen, wie z.B. das Messmodul für Langzeitmessungen. Die Messmodule fungieren als Schnittstellen zwischen dem Analyzer und dem zu testenden Gerät oder Netzwerk. In dem vorhandenen Messgerät kommen zwei verschiedene Messmodule zum Einsatz. Bei den in Abbildung 27 rot gekennzeichneten Modulen (A) handelt es sich jeweils um das Messmodul vom Typ MU120111A und bei den in blau gekennzeichneten (B) um die Messmodule für Langzeitmessungen vom Typ MU120121A. Beide Varianten sind in zweifacher Ausführung vorhanden. Bei den Messmodulen handelt es sich um Ethernet-Module, die über RJ-45 Anschlüsse. Der Unterschied zwischen beiden Varianten besteht in der unterstützten Datenübertragungsrate und der Größe des Messwertspeichers. Das Messmodul der Variante MU120111A unterstützt Datenübertragungsraten von 10 bis 100 MBit/s bei einem Messwertspeicher von 8 Mbyte pro Messport und das Messmodul der Variante MU120121A unterstützt Datenübertragungsraten von 10 bis 1000 MBit/s bei einem Messwertspeicher von 64 Mbyte pro Messport [45], [46]. Die Anritsu-Software MX123001A des Data Quality Analyzer ist direkt auf dem Messgerät installiert. Sämtliche Funktionen und Parametereinstellungen können somit direkt im Anritsu Analyzer erfolgen. Mit der Software sind folgende Aktionen durchführbar:

- Erzeugung und Konfigurierung verschiedener Datenpakete und -ströme
- Analyse von Datenpaketen
- Reporting verschiedener Messungen

4.4.2.2 Messaufbau

Der Messaufbau des Anritsu-Analyser Konzeptes ist in Abbildung 28 dargestellt. Dabei besteht der Messaufbau aus dem zentralen Anritsu Data Quality Analyzer, dieser ist über eine Standleitung und über den Mobilfunkrouter mit dem Internet verbunden. Das bedeutet,

der zentrale Data Quality Analyzer übernimmt gleichzeitig die Funktion des DEP und DIP. Zudem übernimmt der Data Quality Analyzer das Erzeugen von Datenpakete, das Versenden diese und anschließend empfängt und analysiert er die Datenpakete. Zudem gehört zu diesem Messaufbau ein Mobilfunkrouter mit entsprechender Mobilfunkantenne (siehe Abbildung 28).

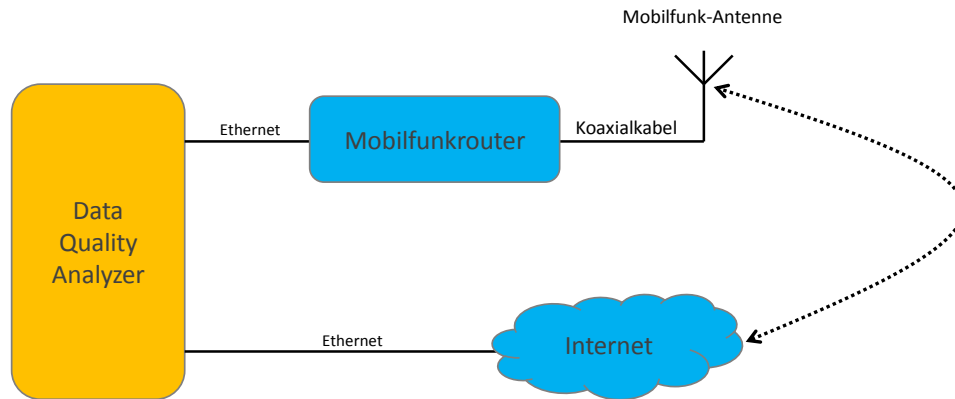


Abbildung 28: Messaufbau des Anritsu Analyser Konzeptes

4.4.3 Mobiler Labormessplatz

4.4.3.1 Konzeptbeschreibung

Für den mobilen Labormessplatz werden Router der Firma CISCO verwendet. Da diese Funktionen integriert haben mit den sich die Kenngrößen:

- Übertragungszeit (Verzögerung Hin- oder Rückrichtung → Delay – one way),
- Antwortzeit (Verzögerung Hin- und Rückrichtung → Delay round trip) und
- Paketverlustrate

messen lassen [38]. Als Referenzschnittstelle wird die Ethernet-Schnittstelle mit einer Datenübertragungsrate von 10/100/1000 MBit/s verwendet. Da die beiden CISCO Router unabhängige Systeme sind ist für die Zeitmessung eine Zeitsynchronisation notwendig. Die Zeitsynchronisation der Router erfolgt über das NTP-Protokoll. Somit ist die Genauigkeit der Zeitmessung abhängig von der per NTP übermittelten Systemzeit im Router. Über das Internet sind Genauigkeiten von wenigen ms möglich, im lokalen Netzwerk sind Genauigkeiten im 100 μ s Bereich möglich. Zudem werden die Zeitstempel für die Zeitmessung per Software ausgelöst, die Genauigkeit hierbei liegt bei ± 1 ms [39].

Die Messwerte werden in regelmäßigen Abständen per Simple Network Protokoll aus dem CISCO Router ausgelesen. Dafür wurde eine Software implementiert um die CISCO IP SLA Parameter zu visualisieren und zu speichern.

4.4.3.2 Messaufbau

Der Messaufbau des mobilen Labormessplatzes ist in Abbildung 29 dargestellt. Dieses besteht aus mindestens zwei CISCO Routern und einem SLA Monitor. Der SLA Monitor hat die Aufgabe die CISCO Router zu konfigurieren, die gemessenen Kenngrößen vom Router anzufordern und die Speicherung und Visualisierung der IP SLA Kenngrößen.

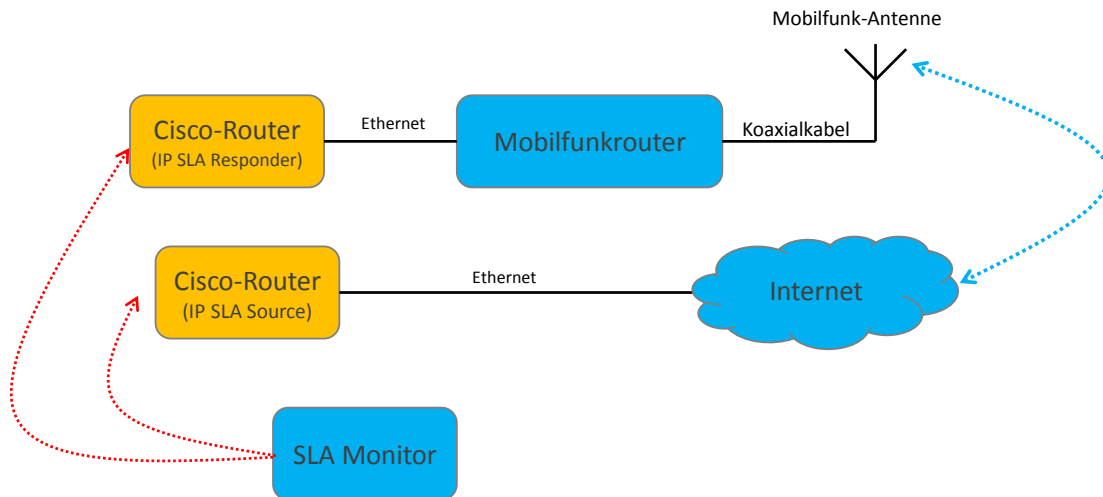


Abbildung 29: Messaufbau des mobilen Labormessplatzes

4.4.4 Embedded Plattform

4.4.4.1 Konzeptbeschreibung

Bei dem Konzept Embedded Plattform wurde ein Messsystem entwickelt, mit dem ein kostengünstiger und mobiler Hardwareaufbau möglich ist. Der zentrale Bestandteil dieses Konzeptes ist der Einplatinen-Computer Raspberry-Pi. Als Referenzschnittstelle wird die Ethernet-Schnittstelle mit einer Datenübertragungsrate von 100 MBit/s verwendet. Da die beiden Embedded Plattformen räumlich getrennt sind ist eine Zeitsynchronisation notwendig. Für die Zeitsynchronisation kommt das Global Navigation Satellite System (GNSS) – Modul MAX-7Q von der Firma u-blox zum Einsatz (siehe Abbildung 30). Es ist ein autonomes System und unterstützt alle gängigen Navigationssatellitensysteme (GPS, GLONASS, QZSS). Das GNSS-Modul empfängt über eine angeschlossene GPS-Antenne einen Zeitimpuls, der die aktuelle Zeitangabe in Universal Time Coordinated (UTC) enthält. Die Genauigkeit der GPS-Zeit liegt bei $\pm 1 \mu\text{s}$. Somit ist eine präzise Zeiterfassung für die Datenübertragung möglich. Das GNSS-Modul wird mit dem Raspberry Pi über die General Purpose Input/Output - Schnittstelle (GPIO) verbunden. Die GPS-Antenne wird wiederum über eine SMA-Steckverbindung an das GNSS-Modul angeschlossen.

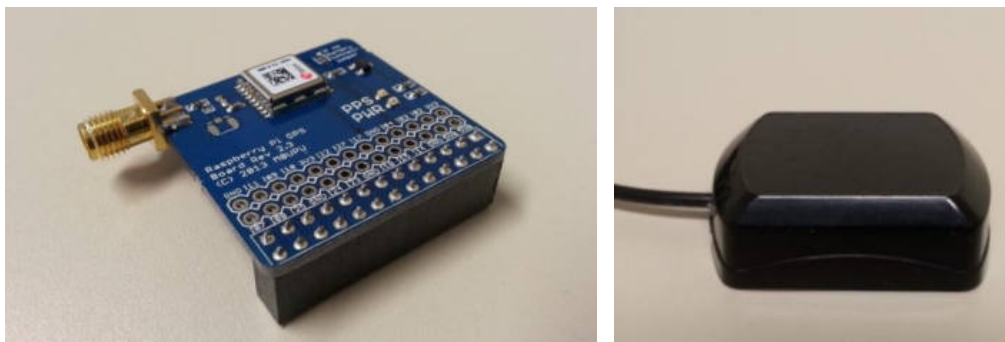


Abbildung 30: GNSS-Modul mit aktiver GPS Antenne

Bei dem Embedded Plattform Konzept existiert keine Anwendungssoftware, welche die Kenngrößen ermittelt, speichert und auswertet. Aus diesem Grund ist eine eigene Softwareimplementierung notwendig. Bei dieser Softwareimplementierung handelt es sich hierbei um eine webbasierte Anwendung (siehe Abbildung 31). Über eine Web-Oberfläche lassen sich Testfälle konfigurieren und starten. Bei den Testfällen können die Einflussgrößen Sendezeitabstand, Paketgröße, Anzahl der Datenpakete und Transportprotokoll parametrisiert werden. Zudem ist eine grafische Darstellung der Messwerte möglich. Hierfür werden

Funktionen der Programmiersprache für statistisches Rechnen R verwendet. Für die Konfiguration und den Messwertdownload werden die Raspberry Pi Module mit einem VPN-Netzwerk verbunden.

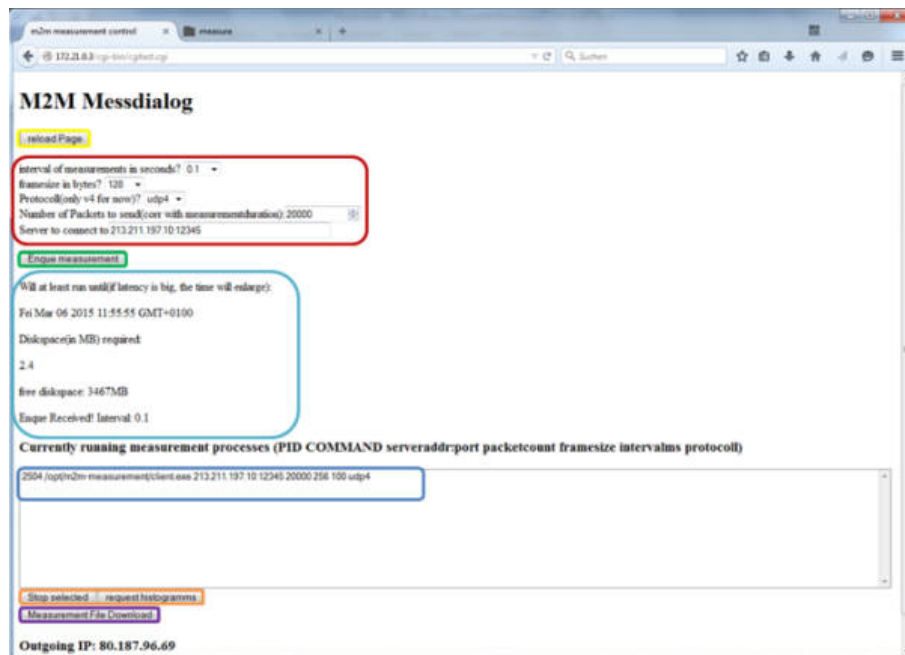


Abbildung 31: Konfiguration der Embedded Plattform

4.4.4.2 Messaufbau

Der Messaufbau des Embedded Plattform Konzeptes ist in Abbildung 32 dargestellt. Dieses besteht aus mindestens zwei Raspberry Pi Modulen mit integrierten GNSS-Modulen und aktiver GPS-Antenne. Zudem gehören zu diesem Messaufbau der Mobilfunkrouter mit Mobilfunkantenne, einem Router, sowie einem Server für die VPN Verbindung.

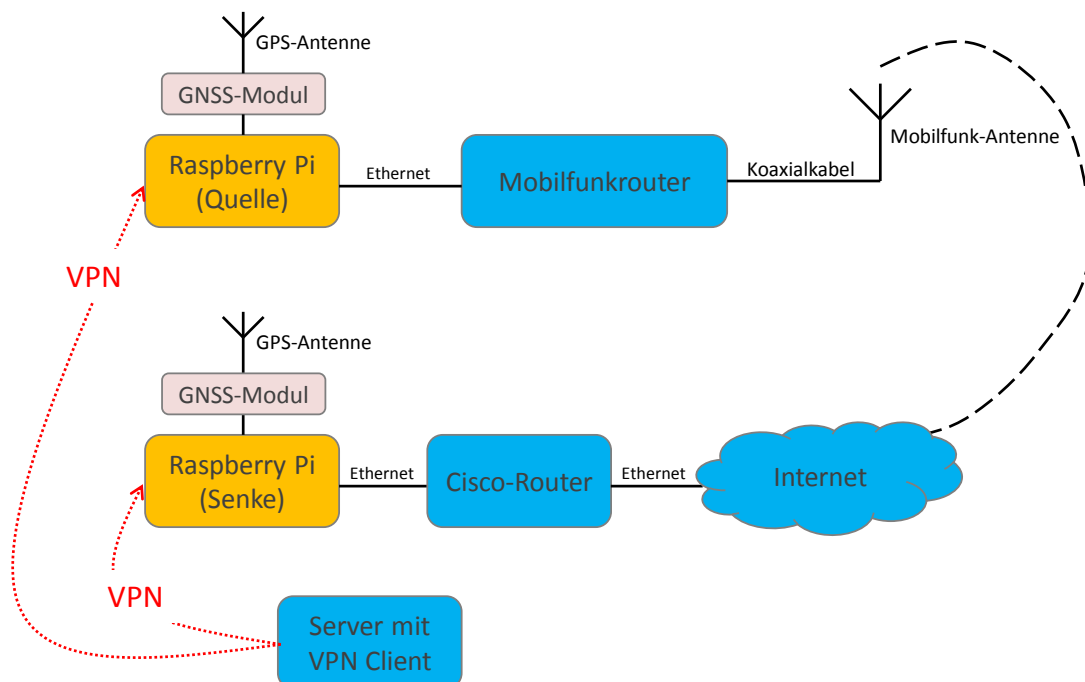


Abbildung 32: Messaufbau des Embedded Plattform Konzeptes

4.4.5 Bewertung der Konzepte

In den vorherigen Kapiteln 4.4.2, 4.4.3 und 4.4.4 sind die betrachteten Konzepte hinsichtlich Hardware, Software und des Messaufbaus detailliert beschrieben. Sie wurden entwickelt, um insbesondere die Übertragungszeit, Aktualisierungszeit und die Paketverlustrate während einer Datenpaketübertragung zu ermitteln. Um einen Vergleich dieser primären Kenngrößen vollziehen zu können und mögliche Fehlerquellen des einzelnen Konzeptes aufzudecken, kam es zum Entwurf von zwei unabhängig voneinander bestehenden Modellen. Jedes der Beiden besitzt dabei gewisse Vor- und Nachteile. In folgenden Merkmalen unterscheiden sich die beiden Konzepte:

- Messwertspeicher
- Mobilität
- Messgenauigkeit

Messwertspeicher:

Bezüglich des Messwertspeichers sind die Messungen bei dem Anritsu-Analyser Konzept begrenzt. Da die Speicherkapazität nur 64 Megabyte pro Messport beträgt. Ist dieses Speichervolumen erreicht, können keine Messwerte mehr gespeichert werden. Bei dem CISCO und Embedded Plattform Konzept ist dies anders. Hier werden die Messwerte auf einer Festplatte oder SD-Karte gespeichert. Somit ist der Messwertspeicher beliebig erweiterbar und mehrtägige Messungen sind ohne Probleme möglich.

Mobilität:

Beim Anritsu-Analyser Konzept ist der Data Quality Analyzer der zentrale Bestandteil und die Quelle und Senke befinden sich an einem zentralen Messort.

Beim CISCO und Embedded Plattform Konzept ist dies anders. Hier sind Quelle und Senke physisch voneinander getrennt, sodass die Quelle sich an einem anderen Ort als die Senke befinden kann. In Anbetracht dieser Umstände sind die Messungen beim Anritsu-Konzept jeweils an einem Ort gebunden. Beim CISCO und Embedded Plattform Konzept sind sie dagegen ortsungebunden, sodass die Datenübertragung bei einer größeren Entfernung von Quelle und Senke erfolgen kann. Dies ist praxisrelevanter, da gerade im industriellen Bereich die zu überwachende Anlage oder Maschine zumeist über eine größere Distanz von der zentralen Leitwarte entfernt ist.

Messgenauigkeit:

Hinsichtlich der Messgenauigkeit unterscheiden sich die Konzepte deutlich. Mit dem Data Quality Analyzer wird eine Messgenauigkeit im Bereich von Nanosekunden erreicht. Beim CISCO Konzept und beim Embedded Plattform Konzept wird eine Messgenauigkeit im Bereich von Mikrosekunden ermöglicht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die drei zur Verfügung stehenden Konzepte ihre Vor- und Nachteile aufweisen. In Tabelle 18 ist eine Übersicht zur Bewertung der Konzepte aufgelistet. Das Konzept Anritsu Analyser hat eine sehr hohe Messgenauigkeit, aber bei den Anforderungen an Messwertspeicher, Mobilität und Hardwarekosten schneidet es schlecht ab. Für Langzeittests mit großen Nutzdatenlängen kommt das Anritsu-Konzept gar nicht in Frage, es kann nur lediglich für die Validierung der anderen Konzepte verwendet werden. Das Konzept CISCO hat Vorteile beim Messwertspeicher und kann mobil eingesetzt werden bei einer guten Messgenauigkeit. Allerdings schneidet es bei den Hardwarekosten schlecht ab, aus diesem Grund wird das CISCO Konzept nur beim Labormessplatz weiter betrachtet. Das Konzept mit der Embedded Plattform hat Vorteile beim Messwertspeicher, der Mobilität und den Hardwarekosten. Aus diesem Grund kommt das Embedded Plattform Konzept für die Leistungsbewertungen von M2M-Netzen zum Einsatz.

Tabelle 18: Konzeptübersicht

Konzept	Anritsu Analyser	CISCO	Embedded Plattform
Messwertspeicher	-	++	++
Mobilität	-	+	++
Messgenauigkeit	++	0	0
Hardwarekosten	-	0	++
Einsatz	-	Labormessplatz	Leistungsuntersuchung

4.5 Durchführung der Messungen

In Tabelle 19 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 19: Testablauf

Testablauf	
Testvorbereitung	
Definition der zu ermittelnden Kenngrößen	
Definition der Kommunikationsschnittstelle(n)	
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 Testsystem	
Realisierung einer Testanwendung	
Testausführung	
Bis alle Testfälle abgearbeitet	Analyse des Testfalls
	Konfiguration der Testanwendung
	Verbindungstest
	Konfiguration des SUT
	Ausführung der Übertragungen lt. Testfall und Ermittlung der Kenngrößen
	Speicherung der Kenngrößen
Testauswertung	
Ermittlung der interessierenden Kenngrößenwerte aus den Messdatenreihen	
Gegenüberstellung der Kenngrößenwerte der einzelnen Testfälle	
Zusammenfassung und Schlussfolgerung	

4.6 Permanente Messeinrichtung für M2M-Netze

Die permanente Messeinrichtung für M2M-Netze besteht aus einem zentralen Datenintegrationspunkt (DIP), der Netzinfrastruktur und mehreren Datenendpunkten (DEP). Der schematische Aufbau ist in Abbildung 33 dargestellt. Zudem sind die Messpunkte für die Ermittlung der Kenngrößen und der Server für die Speicherung und Visualisierung der Messergebnisse in Abbildung 33 dargestellt.

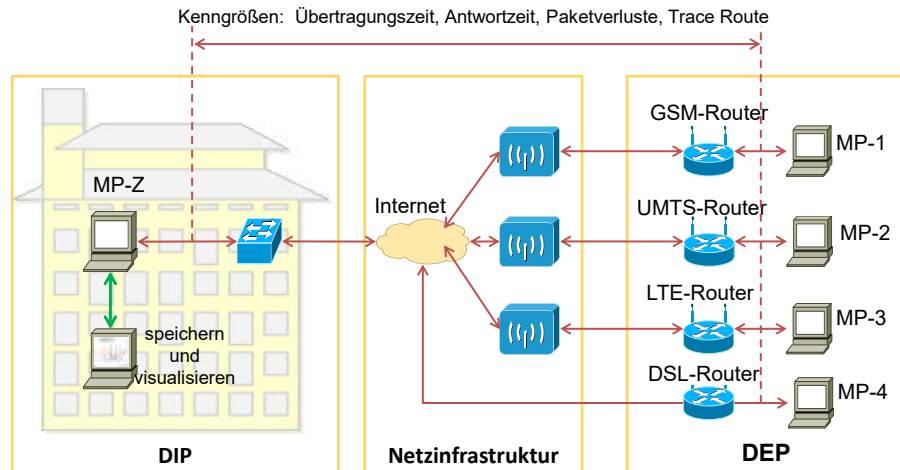


Abbildung 33: Hardwareaufbau

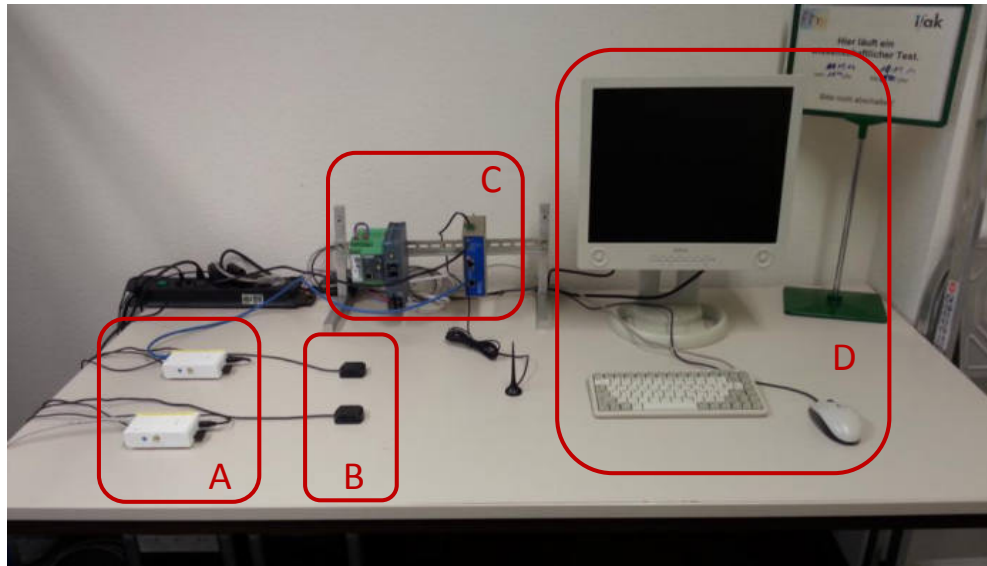
Als Datenintegrationspunkt wird ein Server verwendet, welcher die Verbindung zu den einzelnen Messpunkten via VPN-Verbindung herstellt. Mithilfe einer Weboberfläche können die anwendungsbezogenen Einflussgrößen für jeden Messpunkt (MP) konfiguriert werden. Somit kann für jede Kommunikationsverbindung zwischen DIP und DEP ein Testdatenstrom bzw. mehrere Testdatenströme konfiguriert werden. Bei den einstellbaren anwendungsbezogenen Einflussgrößen handelt es sich um folgende Parameter:

- Version des Internetprotokolls: IPv4, IPv6
- Transportprotokoll: UDP, TCP
- Sendezeitabstand: variabel zwischen 10 ms bis 100 s
- Nutzdatenlänge in Oktett: 64; 128; 256; 512; 768; 1024; 1280; 1518

Über das Webportal können die ermittelten Messergebnisse als CSV-Dateien exportiert werden und stehen somit weiteren Analysen zur Verfügung. Zudem können die Messergebnisse im Webportal grafisch dargestellt werden.

Die Zeitsynchronisation der Messpunkt erfolgt per GPS. Als wichtiger Parameter wird somit auch die GPS basierte Ortsangabe der einzelnen Messpunkte in Grad, Minute, Sekunde für den Breiten- und Längengrad angegeben. Die Position des Messpunktes und die Zuordnung zum Einsatzgebiet (Urban, Suburban, Rural) ist somit möglich.

Als M2M-Baken (DEP) werden industrielle Mobilfunkrouter für die Netzzugangstechnologien GSM, UMTS und LTE verwendet. Dabei ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Mobilfunkrouter nur für eine drahtlose Netzzugangstechnologie konfiguriert sind. Der reale Messaufbau für die permanente Messeinrichtung ist in Abbildung 34 dargestellt. Die Messpunkte (MP-1 bis MP-4) bestehen aus Embedded Plattformen des Typs Raspberry Pi, welche detaillierter in Kapitel 4.4.4 beschrieben sind. Bei den Mobilfunkroutern handelt es sich um Geräte der Firmen des projektbegleitenden Ausschusses (Siemens, Phoenix Contact) und um eine Leihgabe einer weiteren Firma. Es kommt somit der Mobilfunkrouter PSI-Modem-3G/Router der Fa. Phoenix Contact, der Mobilfunkrouter Scalance M873 der Siemens AG und der Mobilfunkrouter TK802L der Fa. Welotec als M2M-Baken zum Einsatz.



A: Raspberry Pi

B: GPS Antenna

C: Mobile Network Routers

D: Server

Abbildung 34: Messaufbau Embedded Plattform

5 Leistungsuntersuchungen von Internetzugangstechnologien

5.1 Einleitung

Heutzutage werden diverse Internet Netzzugangstechnologien schon mit sehr hoher Verbreitung genutzt. Doch die grundlegenden Eigenschaften aus Sicht der Automatisierungstechnik wie das Zeit- und Fehlerverhalten, also die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, der Kommunikationsverbindungen wurden noch nicht hinreichend untersucht und durchdrungen. So berichten Betreiber von M2M-Anwendungen und Hersteller von M2M-Geräten von nicht erklärbaren Effekten in Bezug auf die Verbindungsqualität.

Im Rahmen dieses Projektes werden die Eigenschaften relevanter Netzzugangstechnologien auf ihre Eignung für die Automatisierungstechnik untersucht. Dazu werden entsprechende Langzeitmessungen durchgeführt. Als Analyseergebnis werden Aussagen und Grenzen zur Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der heute verfügbaren Netzzugangstechnologien aufgezeigt.

Gemäß der Vereinbarung mit dem projektbegleitenden Ausschuss liegt der Fokus der Untersuchungen auf den drahtlosen Netzzugangstechnologien. Da diese eine bedeutende Rolle bei aktuellen und zukünftigen Projekten im Umfeld von M2M haben. Zudem war es während der gesamten Projektlaufzeit nicht möglich, einen drahtlosen Netzzugang basiert auf dem Internetprotokoll der Version 6 (IPv6) zu erhalten. Aus diesem Grund beziehen sich die nachfolgenden Messergebnisse auf das Internetprotokoll der Version 4 (IPv4). Das Internetprotokoll der Version 6 (IPv6) wird nur theoretisch in Abschnitt 6.1.1 betrachtet.

5.2 Analyseergebnisse

5.2.1 Netzzugangstechnologie GSM

5.2.1.1 Einfluss des Sendezeitabstandes und der Nutzdatenlänge

Bei der Leistungsbewertung der Netzzugangstechnologie GSM wurde der Einfluss des Sendezeitabstandes (T_{TI}) für unterschiedliche Nutzdatenlängen (L_{Pkt}) ermittelt. Dabei stellte sich heraus, dass der Sendezeitabstand einen wesentlichen und die Nutzdatenlänge einen mäßigen Einfluss auf das Zeit- und Fehlerverhalten der drahtlosen Netzzugangstechnologie GSM hat. Die Wirkung der Einflussgrößen Sendezeitabstand auf die Kenngröße Übertragungszeit sind in Abbildung 35, Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38 mithilfe von Häufigkeitsverteilungen für unterschiedliche Nutzdatenlängen dargestellt. Zudem sind die statischen Parameter der Kenngröße Übertragungszeit, die Paketverlustrate und die Anzahl an verlorenen Paketen in Tabelle 20, aufgelistet. Bei einem Sendezeitabstand von 100 ms (siehe Abbildung 35 und Tabelle 20), sowie bei einem Sendezeitabstand von 250 ms (siehe Abbildung 36 und Tabelle 20) erreicht der Mobilfunkrouter für die Netzzugangstechnologie GSM eine Sättigung und kann nicht alle Kommunikationsanforderungen bearbeiten. Es kommt bei einem Sendezeitabstand von 100 ms zu Übertragungszeiten größer als 20 s, für die Paketlänge von 512 Byte wurde eine maximale Übertragungszeit von 89,2 s ermittelt. Beim Sendezeitabstand von 250 ms treten ebenfalls maximale Übertragungszeiten von 46,5 s für die Paketlänge von 256 Byte und eine maximale Übertragungszeit von 33,5 s für eine Paketlänge von 512 Byte auf. Ein weitere Indiz für die Sättigung sind die statischen Parameter des Perzentil. Bei dem Sendezeitabstand von 100 ms wird der Perzentilwert P90 und bei dem Sendezeitabstand von 250 ms wird der Perzentilwert P99 für die Paketlängen von 256 Byte und 512 Byte sehr stark beeinflusst.

Tabelle 20: Statische Parameter der Übertragungszeit für GSM

TI [ms]	L _{Pkt} [Byte]	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N _{PL}	PLR
		Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
100	64	88,4	92,6	158,8	468,2	2065,4	23183,9	23095,5	179	1,8
	256	88,4	92,7	15135,9	18998,7	22305,6	23134,7	23046,3	63	0,6

TI [ms]	L _{Pkt} [Byte]	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N _{PL}	PLR
		Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
250	512	90,2	99,7	11553,3	14927,5	89178,8	98022,3	97932,1	23	0,2
	1024	110,9	116,0	568,2	768,5	1198,8	2617,1	2506,2	25	0,3
	64	87,2	92,6	271,1	486,0	743,5	1989,6	1902,4	564	5,6
	256	89,5	95,7	224,3	474,1	20941,6	46502,1	46412,6	34	0,3
500	512	90,7	94,3	306,2	578,8	21565,4	33507,6	33416,9	21	0,2
	1024	112,1	120,4	285,6	490,5	759,4	2132,2	2020,1	30	0,3
	64	87,5	104,5	124,0	233,1	597,8	4913,0	4825,5	24	0,2
	256	89,9	96,1	209,7	416,7	675,1	2239,8	2149,9	123	1,2
1000	512	90,7	97,5	318,3	490,6	696,1	2417,6	2326,9	58	0,6
	1024	112,3	119,3	366,2	541,1	774,9	2655,5	2543,2	23	0,2
	64	88,7	92,7	258,9	458,2	683,2	4001,2	3912,5	94	0,9
	256	89,8	101,8	207,8	406,5	636,4	2331,5	2241,7	3	0,0
1000	512	90,8	95,2	251,2	449,1	675,1	2355,6	2264,8	1	0,0
	1024	112,0	115,9	152,8	224,1	622,0	1982,9	1870,9	0	0,0

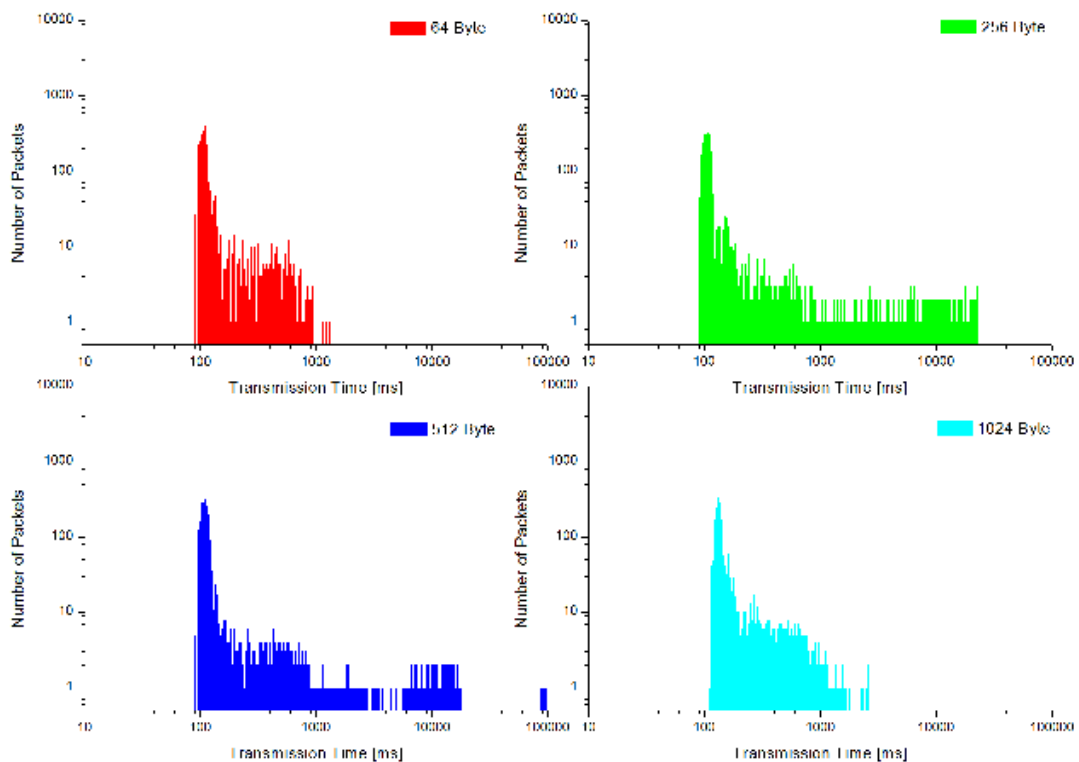


Abbildung 35: Histogramm der Übertragungszeit für einen Sendezeitabstand von 100 ms

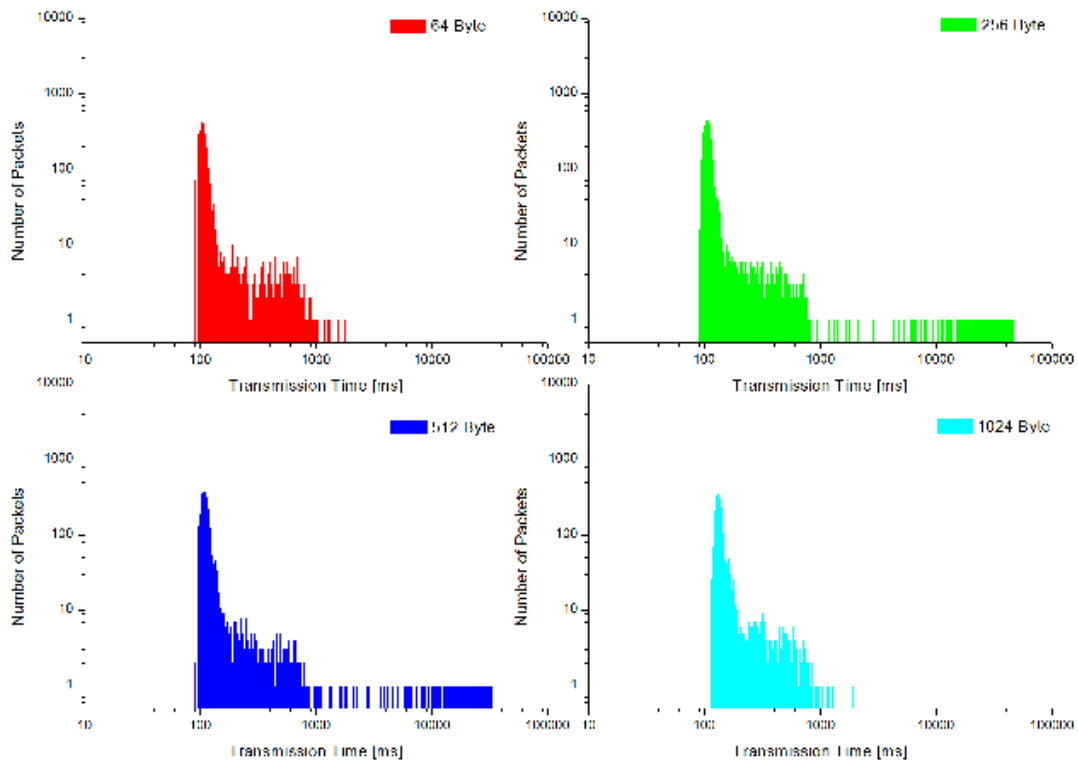


Abbildung 36: Histogramm der Übertragungszeit für einen Sendezeitabstand von 250 ms

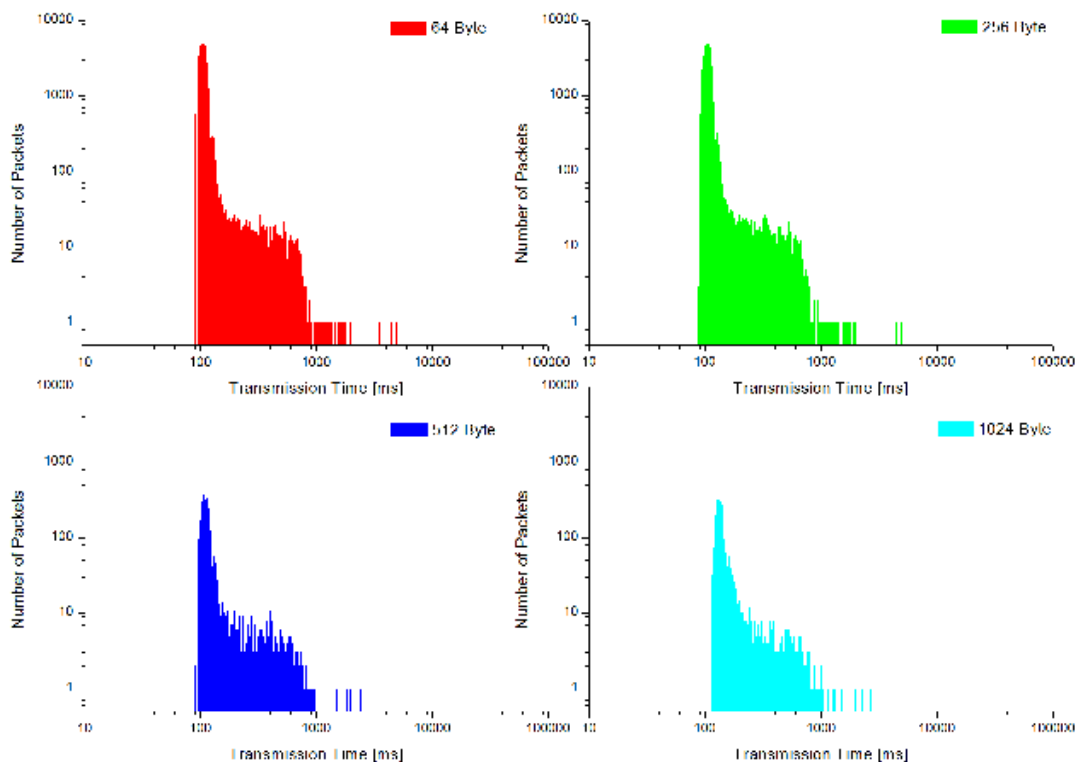


Abbildung 37: Histogramm der Übertragungszeit für einen Sendezeitabstand von 500 ms

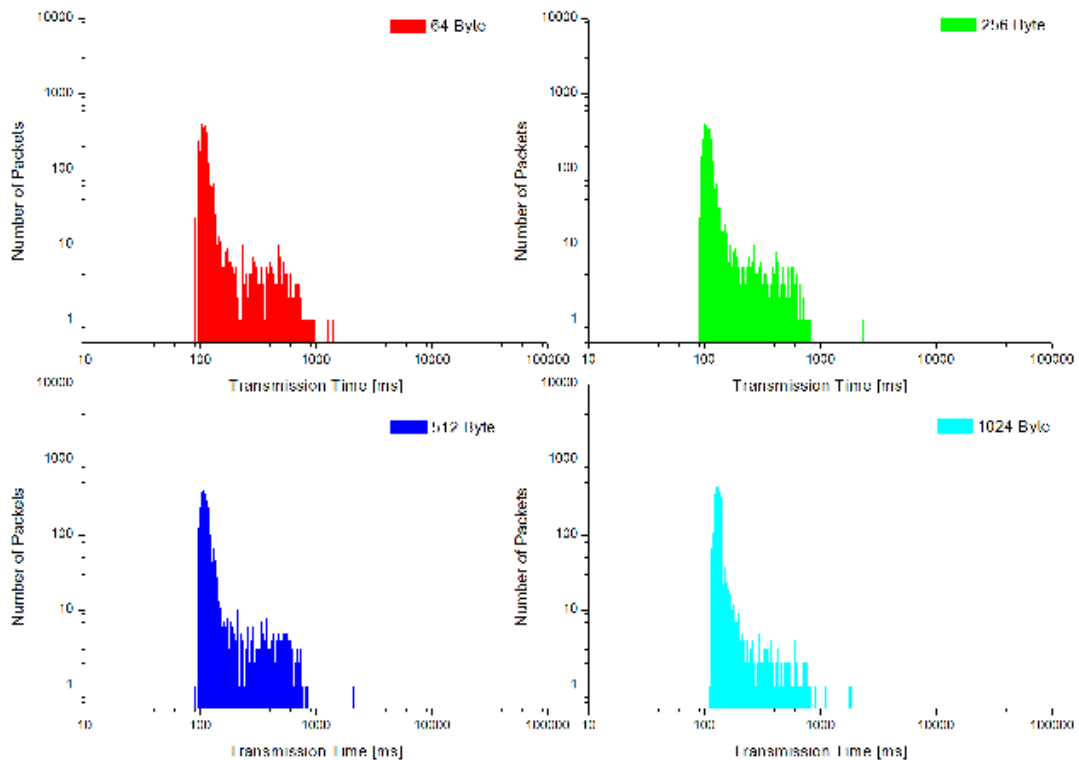


Abbildung 38: Histogramm der Übertragungszeit für einen Sendezeitabstand von 1000 ms

5.2.1.2 Sonstige Einflussgrößen

Die Wirkung von sonstigen Einflussgrößen wurde bei Langzeittests untersucht. Die sonstigen Einflussgrößen lassen sich dadurch charakterisieren, dass diese durch den Anwender nicht beeinflussbar sind. Während der Langzeitmessungen wurde die Downlink-Richtung, die Übertragungsrichtung vom zentralen DIP zum dezentralen DEP (DIP-DEP) und die Uplink-Richtung, die Übertragungsrichtung vom dezentralen DEP zum zentralen DIP (DEP-DIP) betrachtet. In Abbildung 39 sind die gemessenen Werte der Kenngröße Übertragungszeit für die Downlink- und Uplink-Richtung dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das unterschiedliche Zeitverhalten der Kommunikationsverbindung in Download- (DIP-DEP) und Upload-Richtung (DEP-DIP). Anhand der Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 40 und Abbildung 41 wird dieses Verhalten noch einmal verdeutlicht. Zum einen ist die minimale Übertragungszeit in Download-Richtung vom DIP zum DEP 21,8 ms größer als in Upload-Richtung vom DEP zum DIP. Zudem kommt es in Download-Richtung zur Ausprägung mehrerer diskreter Maxima, wobei der Abstand zwischen den einzelnen Maxima der Häufigkeitsverteilung in Abbildung 40 ca. 20 ms beträgt. Das Zeitverhalten in Upload-Richtung vom DEP zum DIP unterscheidet sich hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung deutlich vom Zeitverhalten in Download-Richtung vom DIP zum DIP. In der in Abbildung 41 dargestellten Häufigkeitsverteilung der Übertragungszeit für die Upload-Richtung kommt es nicht zur Ausbreitung von mehreren diskreten Maxima. Die zu Abbildung 39, Abbildung 40 und Abbildung 41 gehörenden statischen Parameter der Kenngröße Übertragungszeit, sowie die Fehlerkenngrößen sind in Tabelle 21 aufgelistet. Bei den Paketverlusten und der Paketverlustrate ist der Wert in Upload-Richtung doppelt so hoch wie in Download-Richtung.

Tabelle 21: Statische Parameter der Übertragungszeit (GSM: $L_{Pkt}=256$ Byte, $T_{TI}=500$ ms)

Übertragungs- richtung	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N_{PL}	PLR
	Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
DEP-DIP	85,5	110,8	118,1	126,7	226,0	11137,5	11052,1	3768	0,6%
DIP-DEP	107,3	123,5	124,0	124,5	299,8	9237,9	9130,6	1674	0,3%

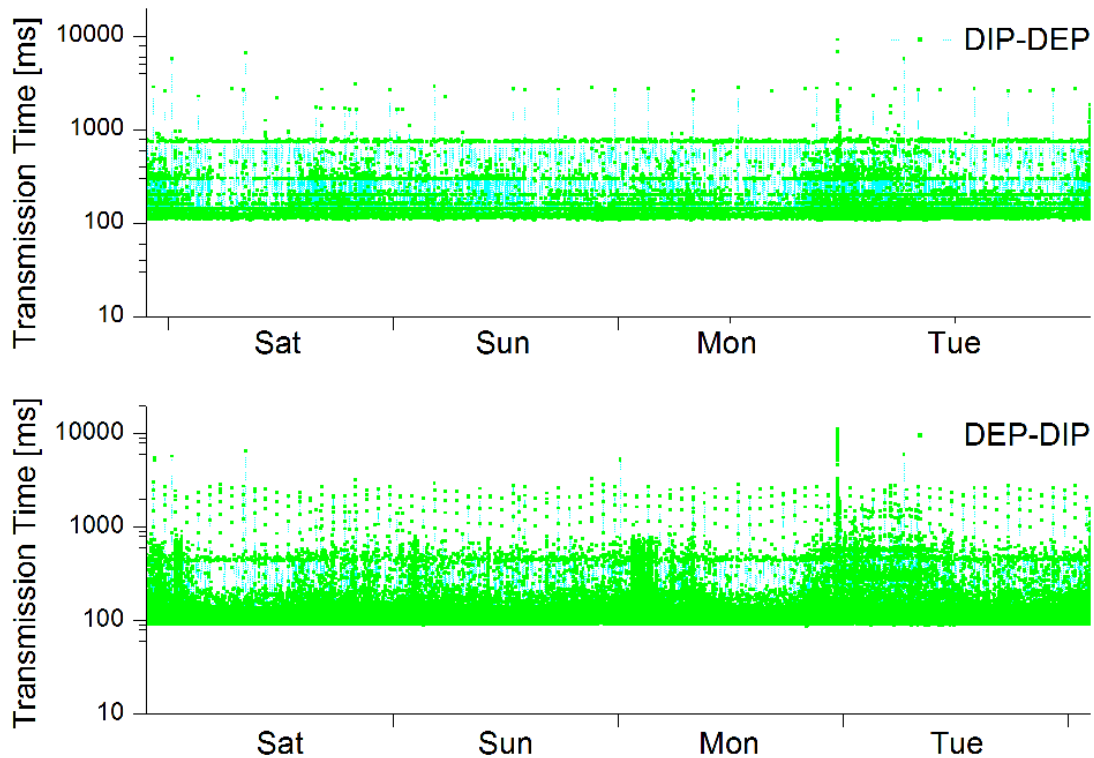


Abbildung 39: GSM Up- und Download-Richtung: $L_{\text{Pkt}}=256$ Byte, $T_{\text{TI}}=500\text{ms}$

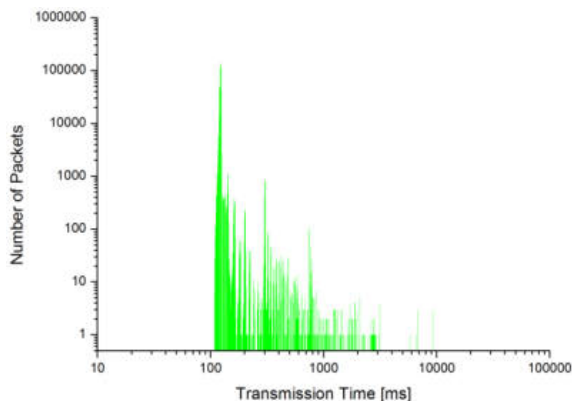


Abbildung 40: GSM Download-Richtung (DIP-DEP) $L_{\text{Pkt}}=256$ Byte, $T_{\text{TI}}=500\text{ms}$

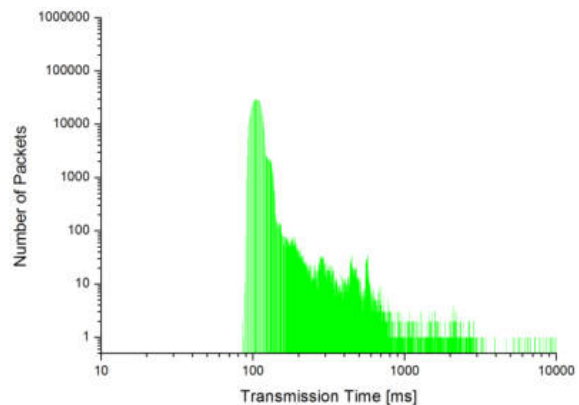


Abbildung 41: GSM Upload-Richtung (DEP-DIP) $L_{\text{Pkt}}=256$ Byte, $T_{\text{TI}}=500\text{ms}$

Während der Langzeitmessungen können einige Besonderheiten im Zeit- und Fehlverhalten ermittelt werden. So treten sporadisch Extremwerte bei den Übertragungszeitwerten auf. Als Beispiel sind die Extremwerte in Abbildung 42 dargestellt. Ab Paketnummer 469750 (07:31:50 Uhr) kommt es über einen Zeitraum von 120 s zu sehr großen Übertragungszeiten. Dabei treten die höheren Übertragungszeitwerte in Download-Richtung auf. In Download-Richtung betragen die fünf höchsten Übertragungszeitwerte dreimal 9,2 s und zweimal 6,8 s. In Uplink-Richtung betragen die fünf höchsten Übertragungszeitwerte 11,1 s; 10,6 s; 10,4 s; 10,2 s und 10,1 s. Zudem kommt es nach großen Übertragungszeitwerten zu Bursts mit Paketverlust. In Download-Richtung wurden Bursts mit 7 bis 19 Paketverlusten und in Upload-Richtung wurden Bursts mit 8 bis 24 Paketverlusten in Folge ermittelt.

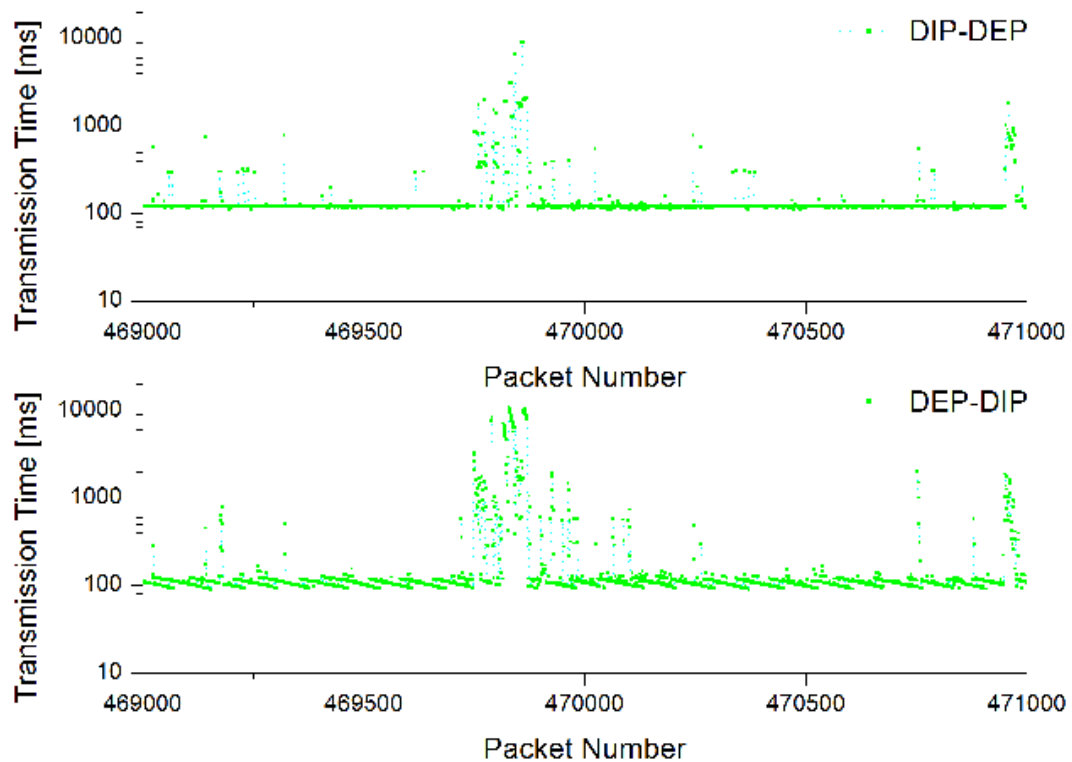


Abbildung 42: Maximale Übertragungszeit (GSM: $L_{\text{Pkt}}=256$ Byte, $T_{\text{TI}}=500\text{ms}$)

Zudem werden Ausreißer mit azyklischen und zyklischen Auftreten in den Zeitreihen von Übertragungszeitwerten ermittelt (siehe Abbildung 43). In Download-Richtung treten Ausreißer mit Übertragungszeitwerten von $300\text{ ms} \pm 15\text{ ms}$ und $800\text{ ms} \pm 15\text{ ms}$ azyklische auf. Zudem kommt es vereinzelt zu Ausreißern mit Übertragungszeitwerten größer als eine Sekunde. In Upload-Richtung treten im Zyklus von 60 Minuten ± 1 Minute Ausreißer mit Übertragungszeitwerten größer als 2 s auf.

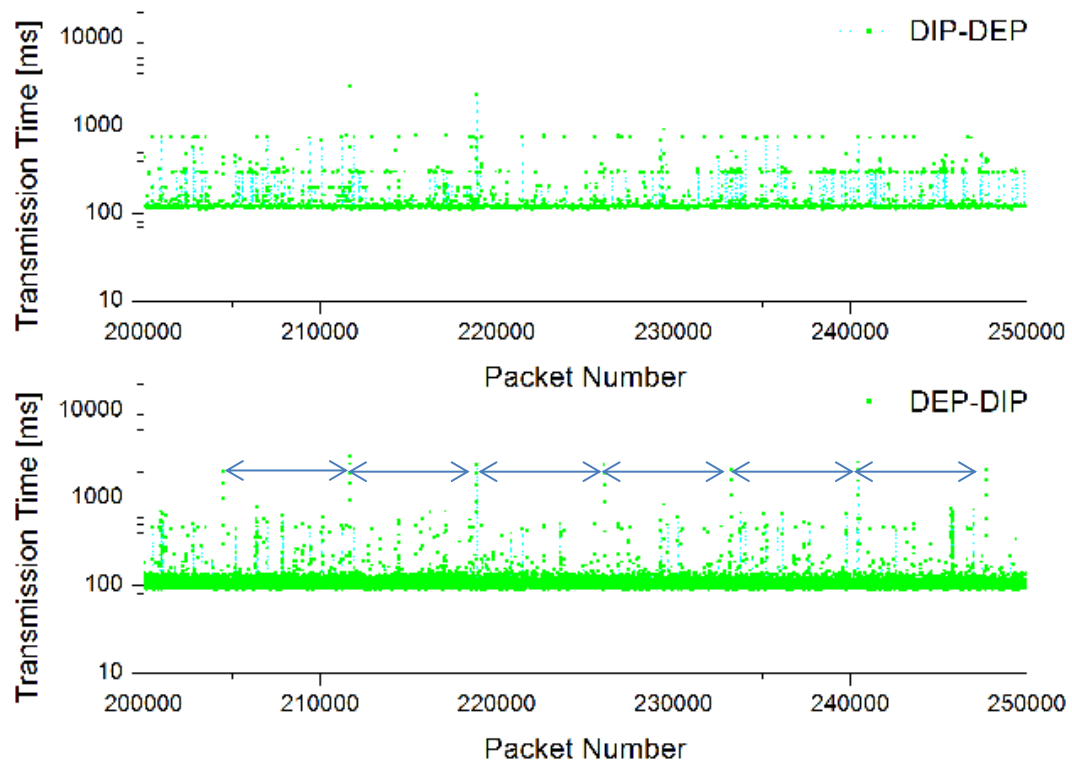


Abbildung 43: Zyklische Ausreißer (GSM: $L_{\text{Pkt}}=256$ Byte, $T_{\text{TI}}=500\text{ms}$)

Zudem ist in Abbildung 44 das typische Zeitverhalten von asynchronen zyklischen Kommunikationsprozessen in Upload-Richtung dargestellt. Die Anwendung sendet zyklisch in 500 ms Abständen Testdaten an das Kommunikationssystem. In diesem Fall der GSM Mobilfunkrouter, welche über EDGE mit der Mobilfunk-Basisstation kommuniziert. Der Mobilfunkrouter bekommt aber nur zu bestimmten Zeiten (Zeitschlitz) eine Sendeberechtigung von der Mobilfunk-Basisstation. In dem in Abbildung 44 dargestellten Fall bekommt der Mobilfunkrouter nur alle 40 ms eine Sendeberechtigung von der Mobilfunk-Basisstation. Da die zyklischen Prozesse der Anwendung und der Kommunikation asynchron ablaufen, stellen sich das in Abbildung 44 dargestellten Sägezahnprofil mit einer Spannweite zwischen Minimum und Maximum von 40 ms ein.

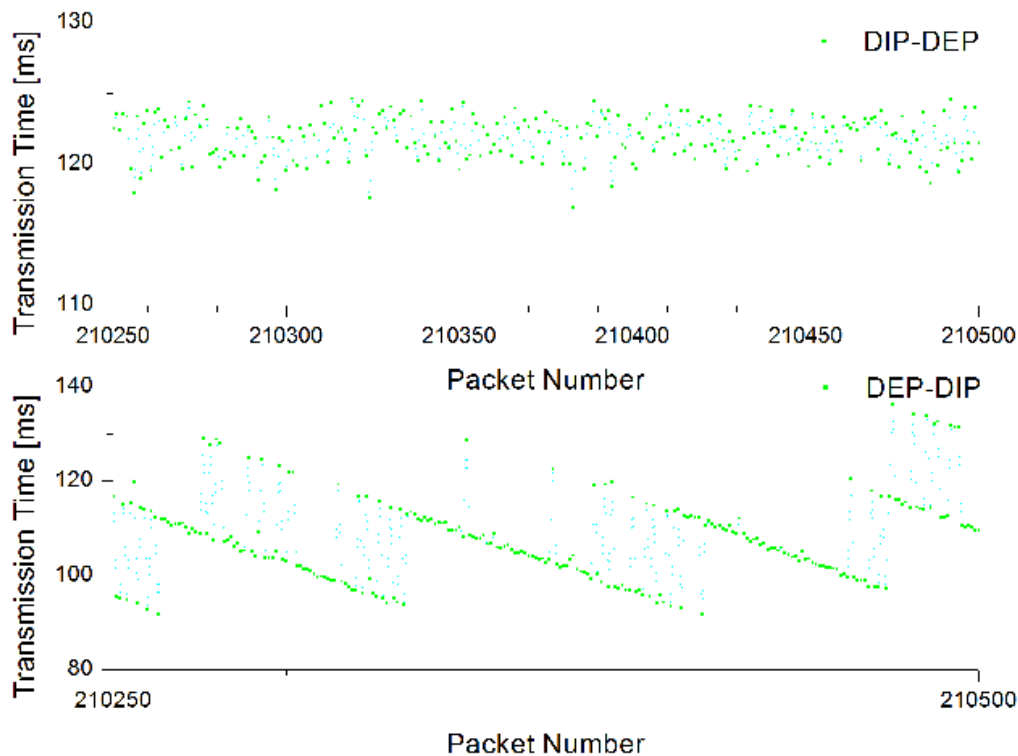


Abbildung 44: Asynchrone zyklische Prozess (GSM: $L_{Pkt}=256$ Byte, $T_{Tl}=500$ ms)

5.2.2 Netzzugangstechnologie UMTS

5.2.2.1 Einfluss des Sendezeitabstandes und der Nutzdatenlänge

Bei der Leistungsbewertung der Netzzugangstechnologie UMTS wurde der Einfluss des Sendezeitabstandes (T_{Tl}) für unterschiedliche Nutzdatenlängen (L_{Pkt}) ermittelt. Es wurden die Sendezeitabstände von 100 ms, 250 ms, 500 ms und 1000 ms für die Nutzdatenlängen von 128 Byte, 256 Byte, 512 Byte und 1024 Byte untersucht. Dabei stellt sich heraus, dass der Sendezeitabstand und die Nutzdatenlänge einen Einfluss auf das Zeit- und Fehlverhalten der drahtlosen Netzzugangstechnologie UMTS haben. Die Wirkung der Einflussgrößen T_{Tl} und L_{Pkt} auf die Kenngröße Übertragungszeit sind in Abbildung 45, Abbildung 46, Abbildung 47 und Abbildung 48 mithilfe von Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Zudem sind die statischen Parameter der Kenngröße Übertragungszeit, die Paketverlustrate und die Anzahl an verlorenen Paketen in Tabelle 22 aufgelistet. Bei Nutzdatenlängen von 128 Byte und 256 Byte treten vermehrt Paketverluste bei den Sendezeitabständen von 100 ms, 250 ms und 500 ms auf. Bei einer Nutzdatenlänge von 128 Byte ergibt sich eine Paketverlustrate von 38,2 % bei einem Sendezeitabstand von 100 ms, von 35,0 % bei einem Sendezeitabstand von 250 ms und von 86,5 % bei einem Sendezeitabstand von 500 ms. Ein vergleichbarer Trend lässt sich für die Nutzdatenlänge von 128 Byte ableiten. So treten bei einem Sendezeitabstand von 100 ms 2,9 % Paketverluste, bei einem Sendezeitabstand von 250 ms 6,5 % Paketverluste und bei einem Sendezeitabstand von 500 ms 7,2 % Paketverluste auf. Bei den Nutzdatenlängen von 512 Byte und 1024 Byte kann dieses

Verhalten nicht festgestellt werden. So liegen die Paketverlustraten bei den Nutzdatenlängen von 512 Byte und 1024 Byte zwischen 0,1 % und 3,1 % bei allen untersuchten Sendezeitabständen. Ab einem Sendezeitabstand von 1000 ms reduziert sich die Paketverlustrate für die Nutzdatenlängen von 128 Byte und 256 Byte.

Tabelle 22: Statische Parameter der Übertragungszeit für UMTS

L_{Pkt} [Byte]	T_{TI} [ms]	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N_{PL}	PLR [%]
		Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
128	100	228,4	-	110886	114263	117960	120636	120408	3818	38,2
	250	51,1	63,7	232,4	275,6	428,1	1963,1	1912,0	287	2,9
	500	50,7	60,8	223,7	229,1	312,8	835,6	784,9	22	0,2
	1000	40,5	60,4	116,4	248,5	264,0	2886,5	2846,0	100	1,0
256	128	52,6	58,5	109122	119231	127359	130918	130869	3495	35,0
	256	51,2	56,3	60259	103426	114628	118339	118288	650	6,5
	512	51,1	59,0	117,1	135,0	159,6	805,1	754,0	10	0,1
	1024	42,0	45,3	63,7	66,5	71,2	1237,4	1195,4	8	0,1
512	128	62,0	-	132185	134294	136794	138284	138222	8654	86,5
	256	52,2	55,4	157,4	510,8	110847	128733	128681	719	7,2
	512	52,4	54,8	114,0	148,0	200,6	520,6	468,2	4	0,1
	1024	42,7	48,6	82,0	86,1	94,5	25643	25599	11	0,1
1024	128	64,47	96,9	134,0	140,3	150,5	400,0	335,5	52	0,5
	256	56,53	114,6	242,8	261,7	307,2	1024,2	967,7	17	0,2
	512	55,3	63,9	254,3	277,2	91334	119426	119371	306	3,1
	1024	56,96	64,5	265,9	342,4	420,3	1762,2	1705,2	76	0,8

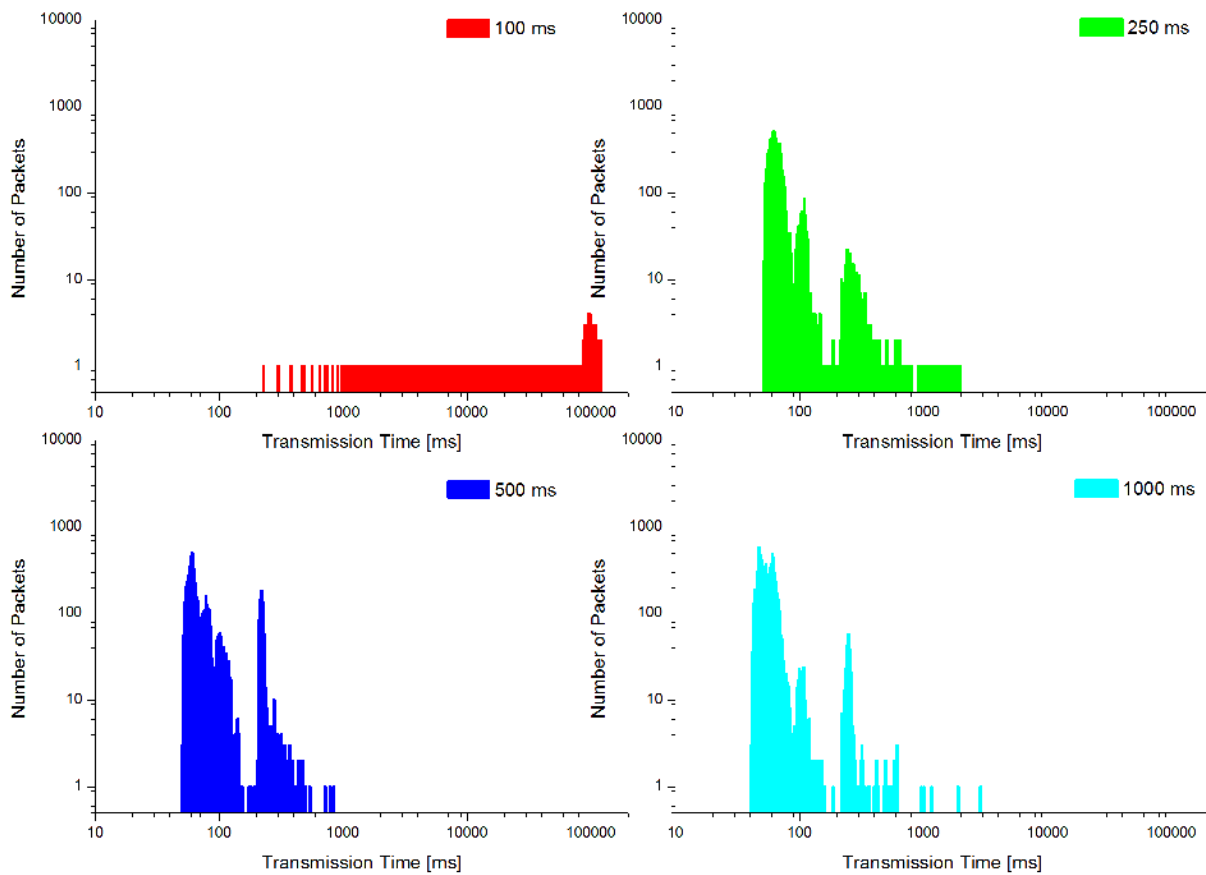


Abbildung 45: UMTS: Histogramme der Übertragungszeit für $L_{Pkt}=128$ Byte

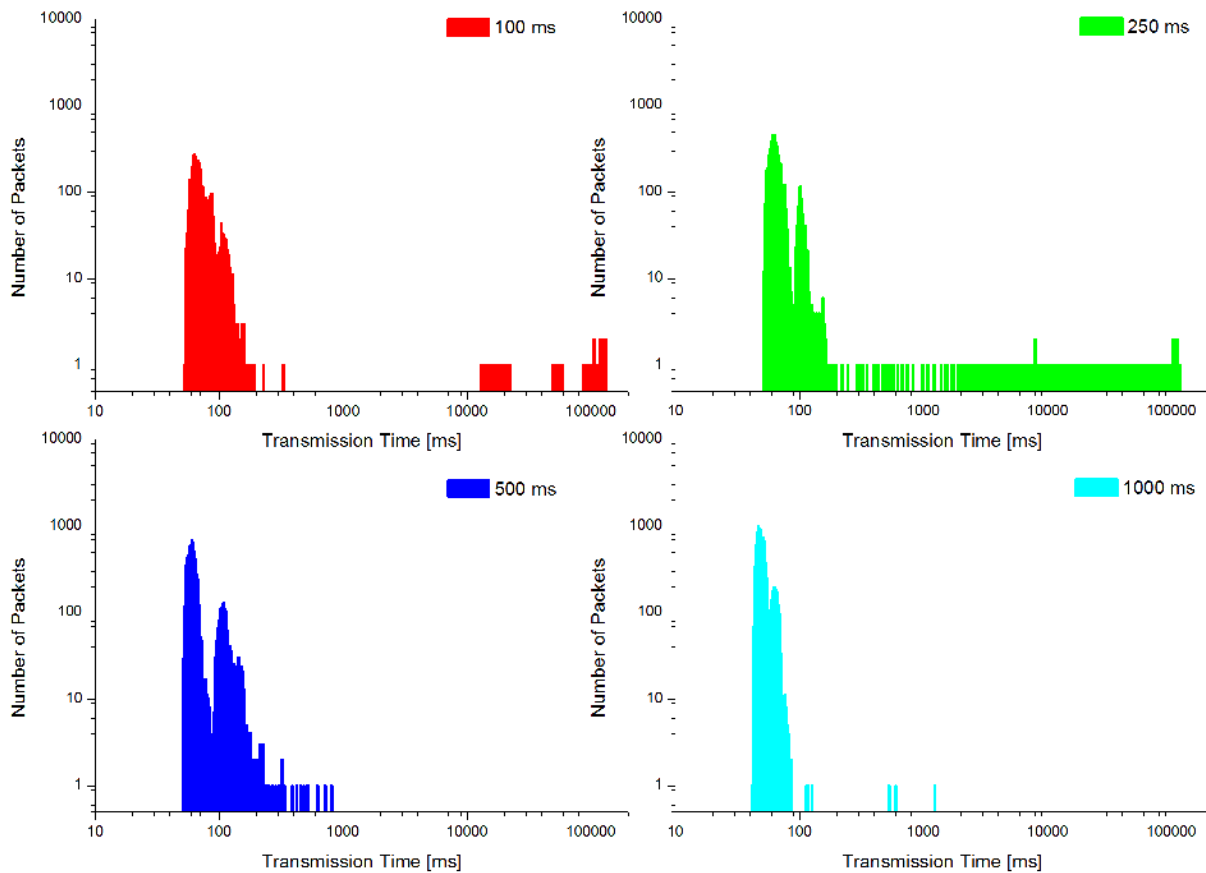


Abbildung 46: UMTS: Histogramme der Übertragungszeit für $L_{Pkt}=256$ Byte

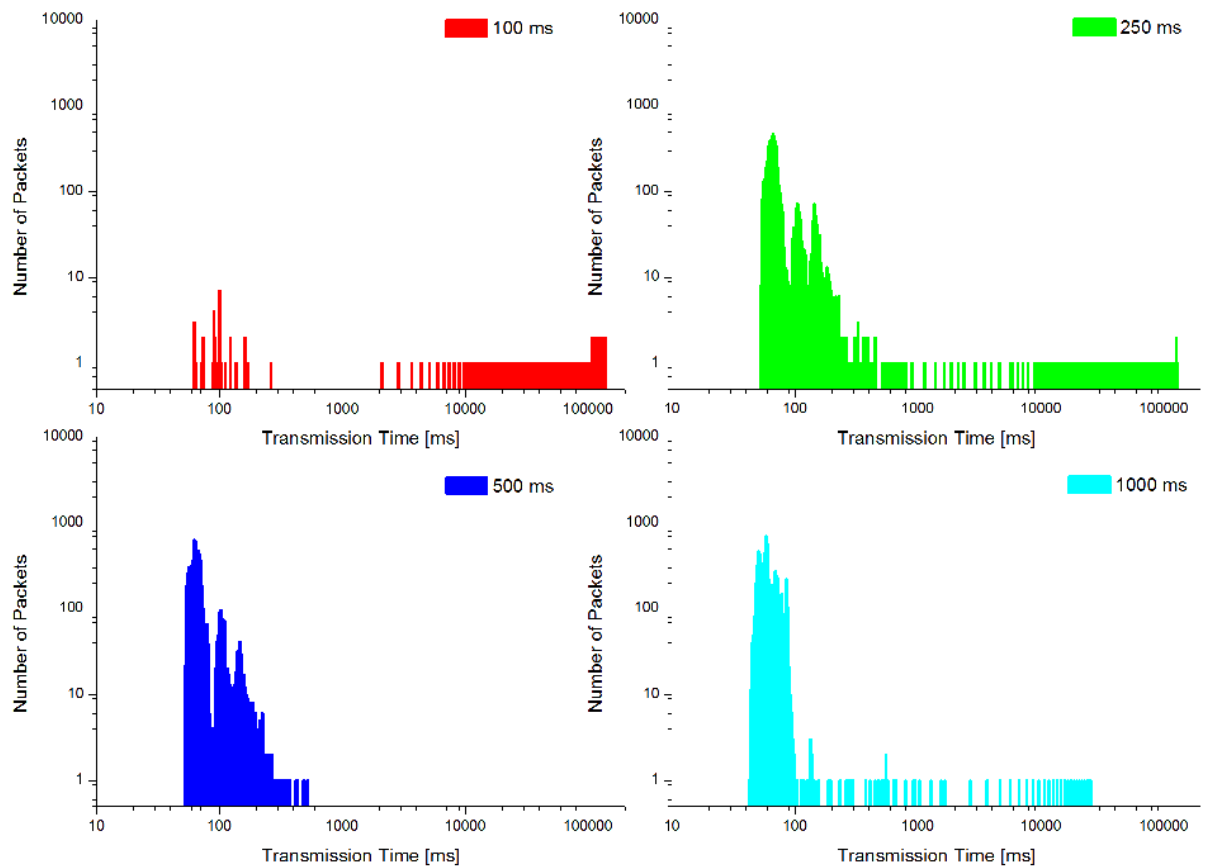


Abbildung 47: UMTS: Histogramme der Übertragungszeit für $L_{pkt}=512$ Byte

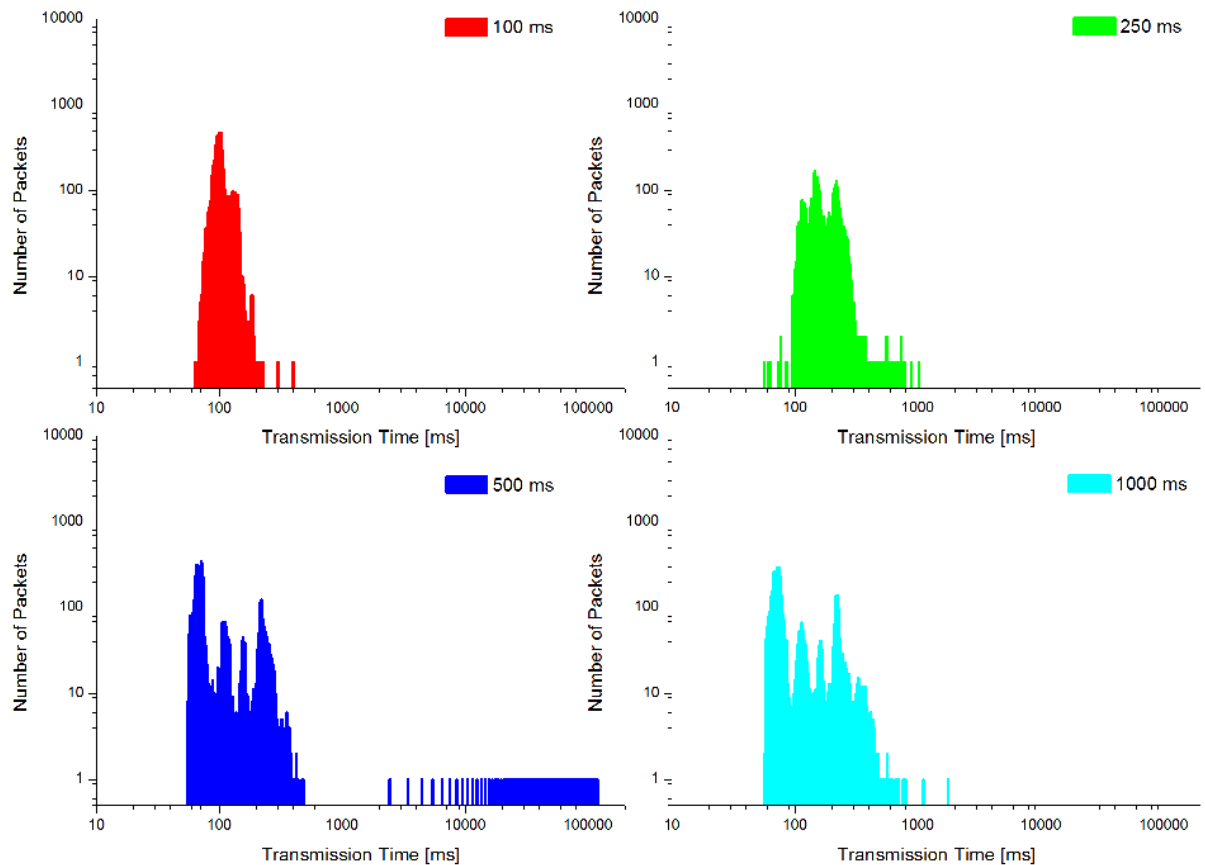


Abbildung 48: UMTS: Histogramme der Übertragungszeit für $L_{pkt}= 1024$ Byte

5.2.2.2 Sonstige Einflussgrößen

Die Wirkung von sonstigen Einflussgrößen wurde bei Langzeittests untersucht. Die sonstigen Einflussgrößen lassen sich dadurch charakterisieren, dass diese durch den Anwender nicht beeinflussbar sind. Während der Langzeitmessungen wurde die Downlink-Richtung, die Übertragungsrichtung vom zentralen DIP zum dezentralen DEP (DIP-DEP) und die Uplink-Richtung, die Übertragungsrichtung vom dezentralen DEP zum zentralen DIP (DEP-DIP) betrachtet.

In Abbildung 49 sind die gemessenen Werte der Kenngröße Übertragungszeit für die Downlink- und Uplink-Richtung für eine Nutzdatenlängen von 128 Byte und einen Sendezeitabstand von 500 ms dargestellt. Die Übertragungszeitwerte sind für eine Dauer von 42 Tagen dargestellt, der Tag „Null“ entspricht einem Mittwoch. Anhand von Abbildung 49 wird deutlich, dass das Zeitverhalten in Down- und Uplink-Richtung starken Einflüssen ausgesetzt ist und es treten starke Ausreiser bei den Übertragungszeitwerten auf. Dabei ist ein deutlicher Unterschied zwischen Down- und Uplink-Richtung festzustellen. In Download-Richtung vom DIP zum DEP treten vereinzelt Ausreiser mit Übertragungszeitwerten größer als 5 Sekunden auf. Am 11. und 12. Tag der Messung kommt es zu burstartigen Häufungen von Ausreißern in der Übertragungszeit. In Uplink-Richtung vom DEP zum DIP treten in Summe mehr Ausreiser mit Übertragungszeitwerten größer als 5 Sekunden auf. Zudem tritt in Uplink-Richtung ein Effekt auf indem sich die minimale Übertragungszeit sprunghaft ändert. So kommt es am 1. und am 36. Tag der Messung zu einem sprunghaften Anstieg der Übertragungszeit von 40 ms auf 60 ms und am 18. Tag der Messung kommt es zu einem sprunghaften Abfall der Übertragungszeit von 60 ms auf 40 ms. In Downlink-Richtung kann dieser Effekt nicht ermittelt werden.

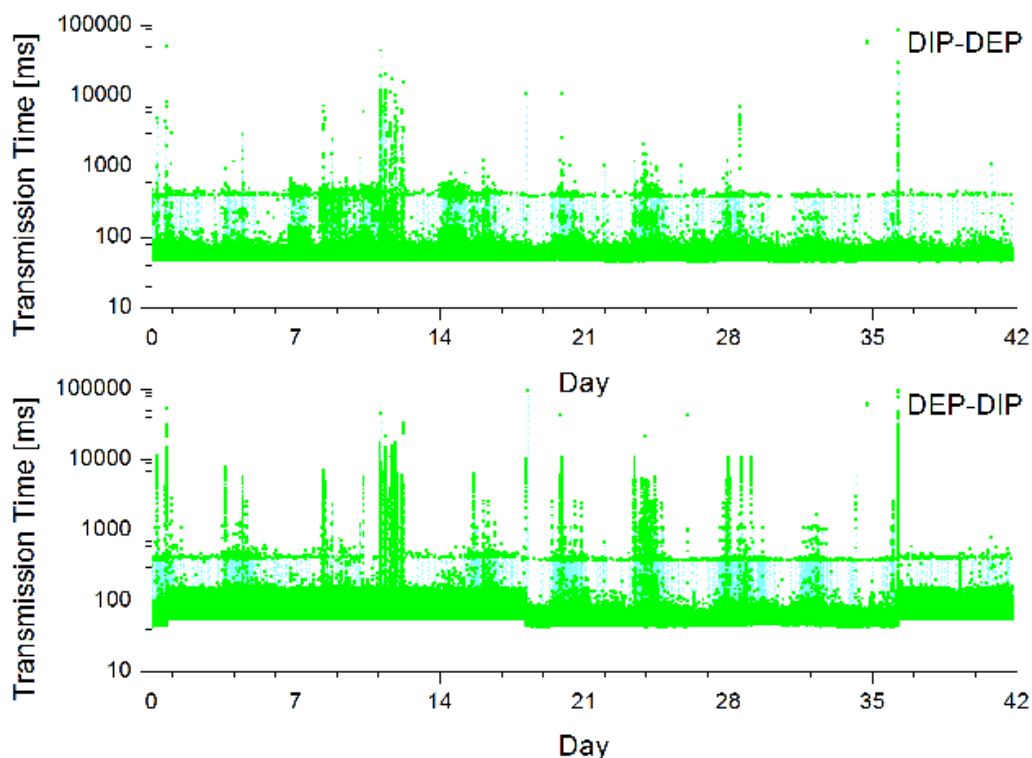


Abbildung 49: UMTS: Sendezeitabstand 500 ms, Nutzdatenlänge 128 Byte

Die Ursache für diesen Effekt ist weitestgehend unbekannt. Allerdings ist dieser Effekt, wie in Abbildung 50 dargestellt, reproduzierbar. Mit einer zusätzlichen Konfiguration der Nutzdatenlänge (64 Byte) und des Sendezeitabstand (1000 ms) stellte sich der gleiche Effekt, mit einer sprunghaften Änderung der minimalen Übertragungszeit, wieder ein.

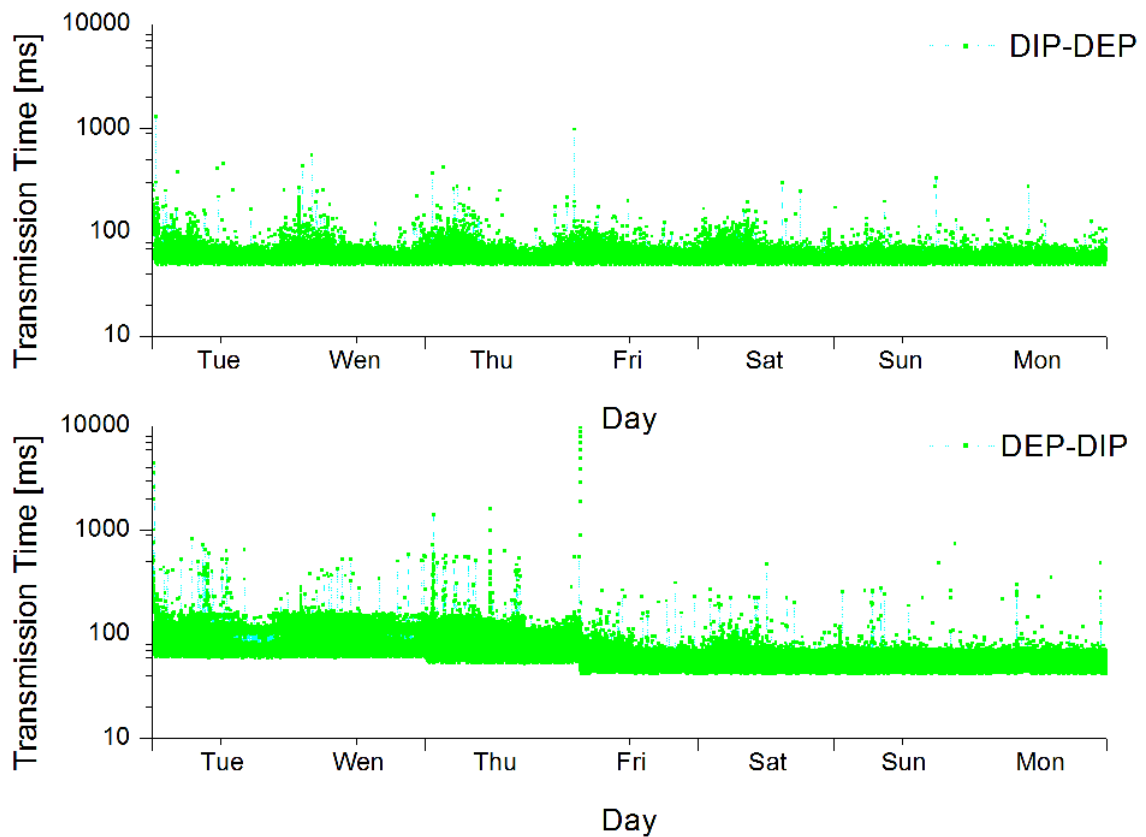


Abbildung 50: UMTS: Sendezeitabstand 1000 ms, Nutzdatenlänge 64 Byte

Zudem ändert sich mit der sprunghaften Änderung der minimalen Übertragungszeit die Häufigkeitsverteilung der Messwerte. Für die Download-Richtung sind die Häufigkeitsverteilungen der Übertragungszeit für den Zeitabschnitt vom 7 bis 14 Tag in Abbildung 51 und für den Zeitabschnitt vom 21 bis 28 Tag in Abbildung 52 dargestellt.

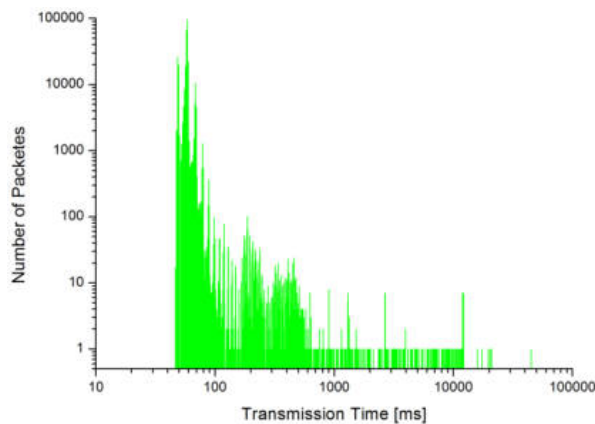


Abbildung 51: UMTS: Übertragungszeit DIP-DEP von Tag 7 bis 14 ($T_{TI}=500$ ms, $L_{Pkt}=128$ Byte)

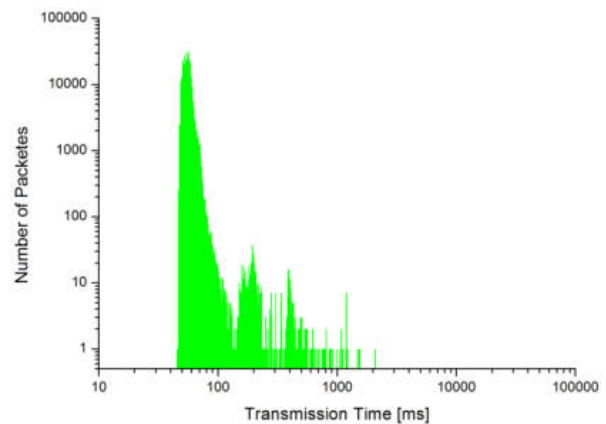


Abbildung 52: UMTS: Übertragungszeit DIP-DEP von Tag 21 bis 28 ($T_{TI}=500$ ms, $L_{Pkt}=128$ Byte)

Für die Upload-Richtung sind die Häufigkeitsverteilungen der Übertragungszeit für den Zeitabschnitt vom 7 bis 14 Tag in Abbildung 53 und für den Zeitabschnitt vom 21 bis 28 Tag in Abbildung 54 dargestellt.

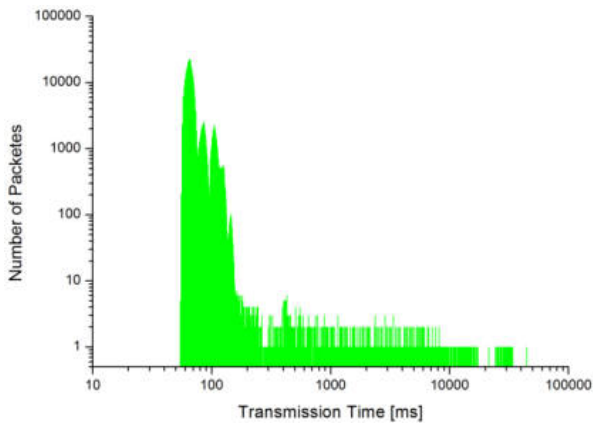


Abbildung 53: UMTS: Übertragungszeit DEP-DIP von Tag 7 bis 14 ($T_{Tl}=500$ ms, $L_{Pkt}=128$ Byte)

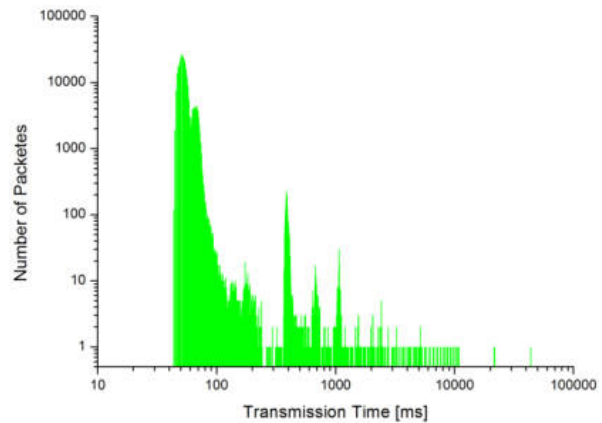


Abbildung 54: UMTS: Übertragungszeit DEP-DIP von Tag 21 bis 28 ($T_{Tl}=500$ ms, $L_{Pkt}=128$ Byte)

Tabelle 23: Statische Parameter der Übertragungszeit für UMTS

Richtg.	Tag	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N_{PL}	PLR [%]
		Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
DIP-DEP	7-14	54,248	65,4	101,9	110,0	133,9	44580	44526	74	0,02
	21-28	45,861	56,8	61,0	64,8	75,8	2074,1	2028,3	201	0,07
DEP-DIP	7-14	46,738	58,2	65,0	68,7	98,8	44919	44872	63	0,02
	21-28	43,342	50,9	67,1	71,1	391,7	43755,8	43712,5	113	0,04

In Abbildung 55 sind nur die Tage 11 und 12 der Messung dargestellt. In diesem Zeitabschnitt treten vermehrt Ausreißer der Übertragungszeitwerte in Downlink-Richtung und burstartige Häufungen von Ausreißern der Übertragungszeitwerte in Uplink-Richtung auf. Auffällig hierbei sein nicht die einzelnen Maximalwerte in Download-Richtung, sondern die burstartigen Maximalwerte in Upload-Richtung. So treten in Upload-Richtung vermehrt Bursts von Paketen mit höheren Übertragungszeitwerten auf. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die Pakete während der Übertragung gespeichert werden und ab einer bestimmten Grenze werden die Pakete in kurzen Zeitabständen verschickt.

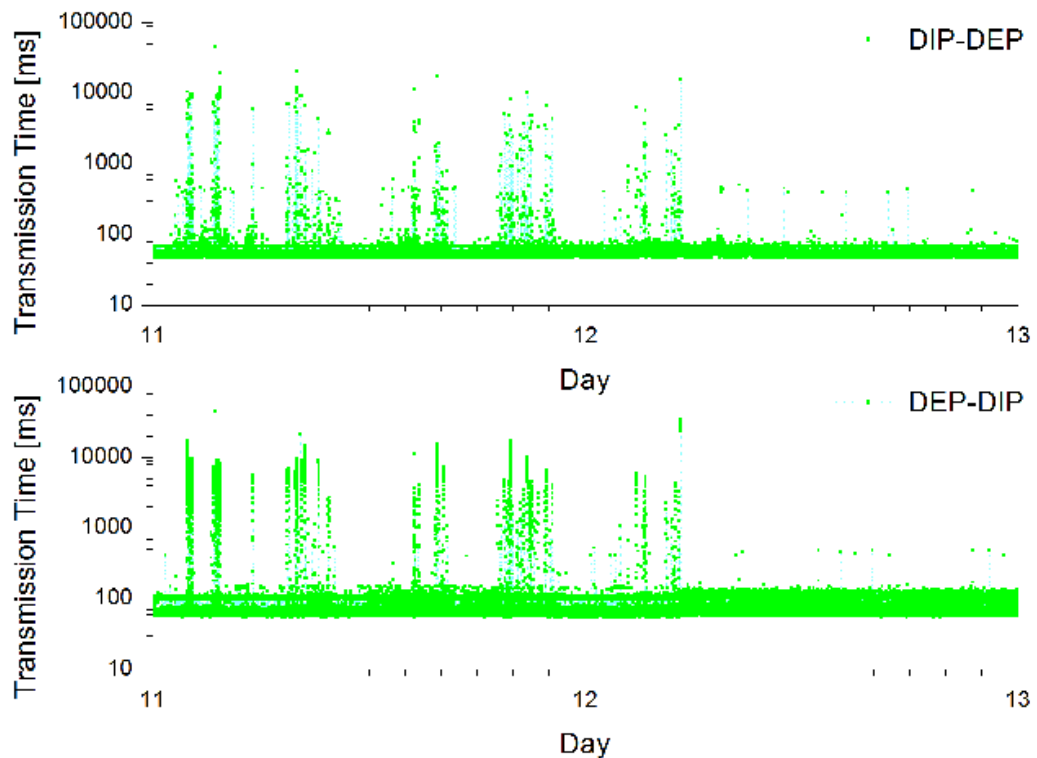


Abbildung 55: UMTS: Burstartige Häufung der Ausreiser ($T_{TI}=500$ ms, $L_{Pkt}=128$ Byte)

5.2.3 Netzzugangstechnologie LTE

5.2.3.1 Einfluss des Sendezeitabstand und der Nutzdatenlänge

Sendezeitabstand

Bei der Leistungsbewertung der drahtlosen Netzzugangstechnologie LTE wurde der Einfluss des Sendezeitabstandes (T_{TI}) für unterschiedliche Nutzdatenlängen ermittelt. Dabei stellt sich heraus, dass der Sendezeitabstand einen wesentlichen Einfluss auf das Zeit- und Fehlverhalten der untersuchten Netzzugangstechnologie hat.

Die Wirkung der Einflussgröße T_{TI} auf die Kenngröße Übertragungszeit ist in Abbildung 56 mithilfe der Häufigkeitsverteilung für eine Nutzdatenlänge von 128 Byte dargestellt. Zudem sind die statischen Parameter der Kenngröße Übertragungszeit, die Paketverlustrate und die Anzahl an verlorenen Paketen in Tabelle 24 aufgelistet.

Bei einem Sendezeitabstand von 50 ms erreicht der Router für die drahtlosen Netzzugangstechnologie LTE eine Sättigung und kann nicht alle Kommunikationsanforderungen bearbeiten. Die rote Häufigkeitsverteilung der Übertragungszeitwerte in Abbildung 56 zeigt keine Auffälligkeiten, aber es kommt zu einer PLR von 28,4 %. Das Optimum des Zeitverhalten für eine Nutzdatenlänge von 128 Byte stellt sich bei einem Sendezeitabstand von 100 ms eine (siehe grüne Häufigkeitsverteilung in Abbildung 56). Bei einem Sendezeitabstand von 100 ms bildet sich eine deutliche Häufung der Übertragungszeitwerte um den Modalwert von 38,4 ms, zudem sind die Perzentilwerte P90, P95 und P99 am niedrigsten und es treten keine Paketverluste auf. Bei einem Sendezeitabstand von 250 ms kommt es bei den Übertragungszeitwerten zur Ausbildung einer bimodalen Verteilung (siehe dunkelblau Häufigkeitsverteilung in Abbildung 56). Wobei das erste Maximum beim Modalwert von 36,1 ms und das zweite Maxima bei 43,2 ms liegt. Die hellblaue Häufigkeitsverteilung in Abbildung 56 zeigt die Übertragungszeitwerte bei einem Sendezeitabstand von 500 ms. Wobei sich eine bimodale Verteilung mit den Maxima bei 36,1 ms und 43,2 ms ausbildet und eine zusätzliche Verteilung bei einer Übertragungszeit von 100 ms ausbildet. Bezogen auf die gesamte Stichprobe werden 50 % der Messwerte mit einer Übertragungszeit kleiner als 55,6 ms empfangen. Dieses Zeitverhalten ist ein Indikator für unterschiedliche Betriebszustände der drahtlosen Netzzugangstechnologie LTE.

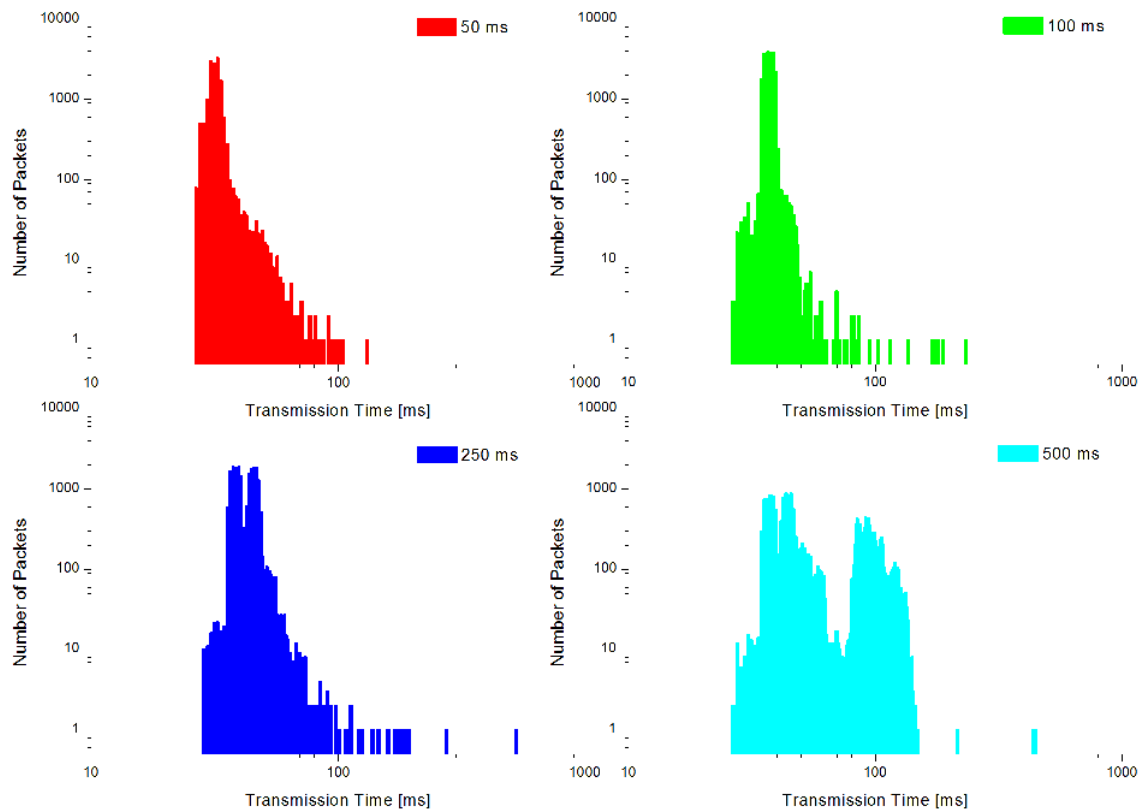


Abbildung 56: LTE: Histogramm der Übertragungszeit für $L_{\text{Pkt}} = 128$ Byte

Tabelle 24: LTE: Statische Parameter der Übertragungszeit ($L_{\text{Pkt}}=128$ Byte)

T_{TI} [ms]	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N_{PL}	PLR
	Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
50	26,3	30,0	34,2	36,0	50,5	131,5	105,2	5679	28,4 %
100	26,6	38,4	39,2	39,7	44,9	231,2	204,7	0	0,0 %
250	26,3	36,1	47,5	49,0	59,8	523,1	496,8	15	0,1 %
500	26,8	43,2	108,0	119,6	131,2	442,0	415,2	0	0,0 %

Die Wirkung der Einflussgröße T_{TI} auf die Kenngröße Übertragungszeit wurde ebenfalls für weitere Nutzdatenlängen untersucht. Die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen für eine Nutzdatenlänge von 1024 Byte sind in Abbildung 57 dargestellt. Zudem sind die statischen Parameter der Kenngröße Übertragungszeit, die Paketverlustrate und die Anzahl an verlorenen Paketen in Tabelle 25 für eine Nutzdatenlänge von 1024 Byte aufgelistet.

Bei den Sendezeitabständen von 50 ms und 500 ms entspricht das Zeit- und Fehlerverhalten von Testdatenpaketen mit einer Nutzdatenlänge von 128 Byte dem Zeit- und Fehlerverhalten von Testdatenpaketen mit einer Nutzdatenlänge von 1024 Byte. Jedoch stellt sich für Testdatenpakete mit einer Nutzdatenlänge von 1024 Byte die bimodale Verteilung schon bei einem Sendezeitabstand von 100 ms ein.

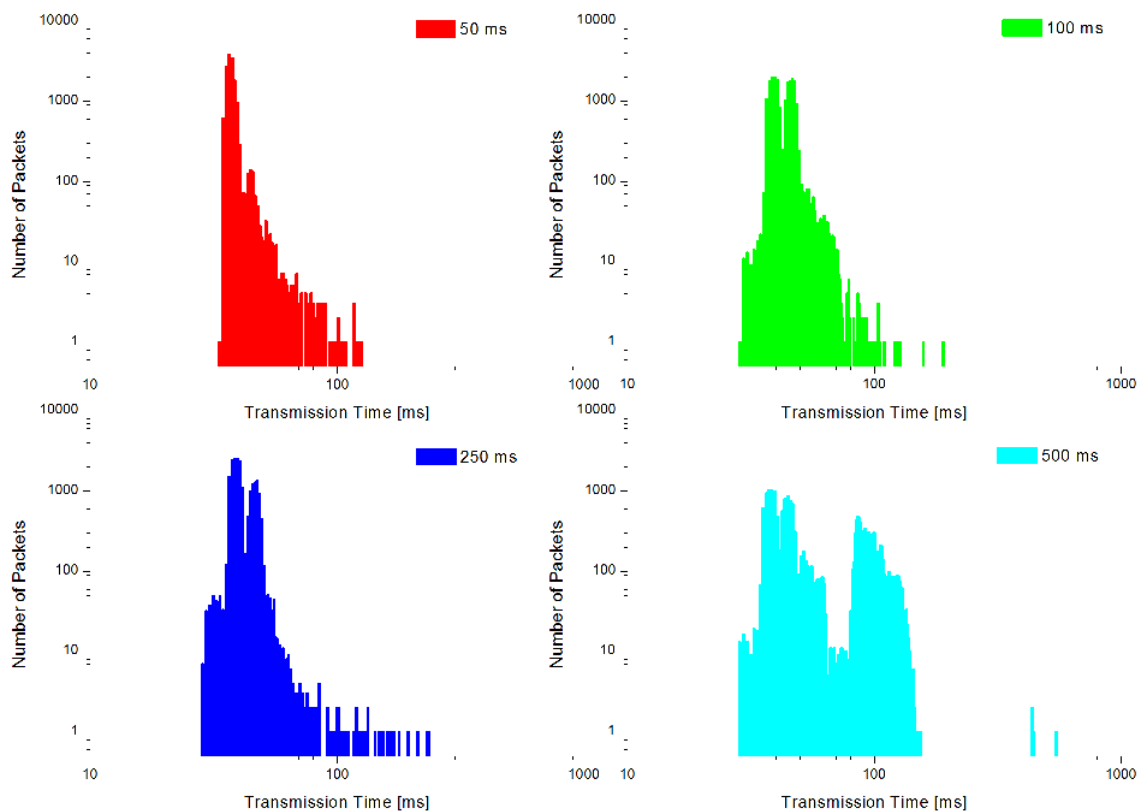


Abbildung 57 LTE: Histogramm der Übertragungszeit für $L_{Pkt} = 1024$ Byte

Tabelle 25: Statische Parameter der Übertragungszeit ($L_{Pkt} = 1024$ Byte)

T_{TI} [ms]	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N_{PL}	PLR
	Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
50	34,0	35,3	39,7	43,8	55,2	125,7	91,7	5536	27,7 %
100	28,9	36,4	48,1	49,5	64,0	190,1	161,2	63	0,3 %
250	28,4	36,5	47,9	48,9	55,4	236,0	207,7	0	0,0 %
500	28,3	37,4	108,0	119,8	131,3	544,0	515,7	0	0,0 %

Nutzdatenlänge

Bei der Leistungsbewertung der Netzzugangstechnologie LTE wurde der Einfluss des Nutzdatenlänge (L_{Pkt}) ermittelt. Dabei stellt sich heraus, dass der Sendezeitabstand einen Einfluss auf das Zeit- und Fehlverhalten der untersuchten Netzzugangstechnologie LTE hat. Die Wirkung der Einflussgröße L_{Pkt} auf die Kenngröße Übertragungszeit ist in Abbildung 58 und Abbildung 59 für unterschiedliche Sendezeitabstände dargestellt. Zudem sind die statischen Parameter der Kenngröße Übertragungszeit, die Paketverlustrate und die Anzahl an verlorenen Paketen in Tabelle 26 und Tabelle 27 aufgelistet.

Bei einem Sendezeitabstand von 100 ms und einer Nutzdatenlänge von 128 Byte, sowie bei einem Sendezeitabstand von 100 ms und 250 ms und einer Nutzdatenlänge von 256 Byte kommt es zur Ausbildung eines Maxima in der Häufigkeitsverteilung der Übertragungszeit (siehe Abbildung 58 und Abbildung 59). Bei allen anderen in Abbildung 58 und Abbildung 59 dargestellten Kombinationen von Nutzdatenlängen und Sendezeitabstand kommt es zur Ausbildung einer bimodalen Verteilung. Wobei das erste Maximum dem Modalwert entspricht. Auffällig sind die bimodalen Verteilungen für den Sendezeitabstand von 100 ms mit einer Nutzdatenlänge von 1024 Byte und für den Sendezeitabstand von 250 ms und einer Paketlänge von 128 Byte. Bei diesen Kombinationen aus Sendezeitabstand und Paketlänge bilden sich zwei gleichgroße Maxima aus. Dargestellt ist dieses Verhalten in der

hellblauen Häufigkeitsverteilung in Abbildung 58 und in der roten Häufigkeitsverteilung von Abbildung 59.

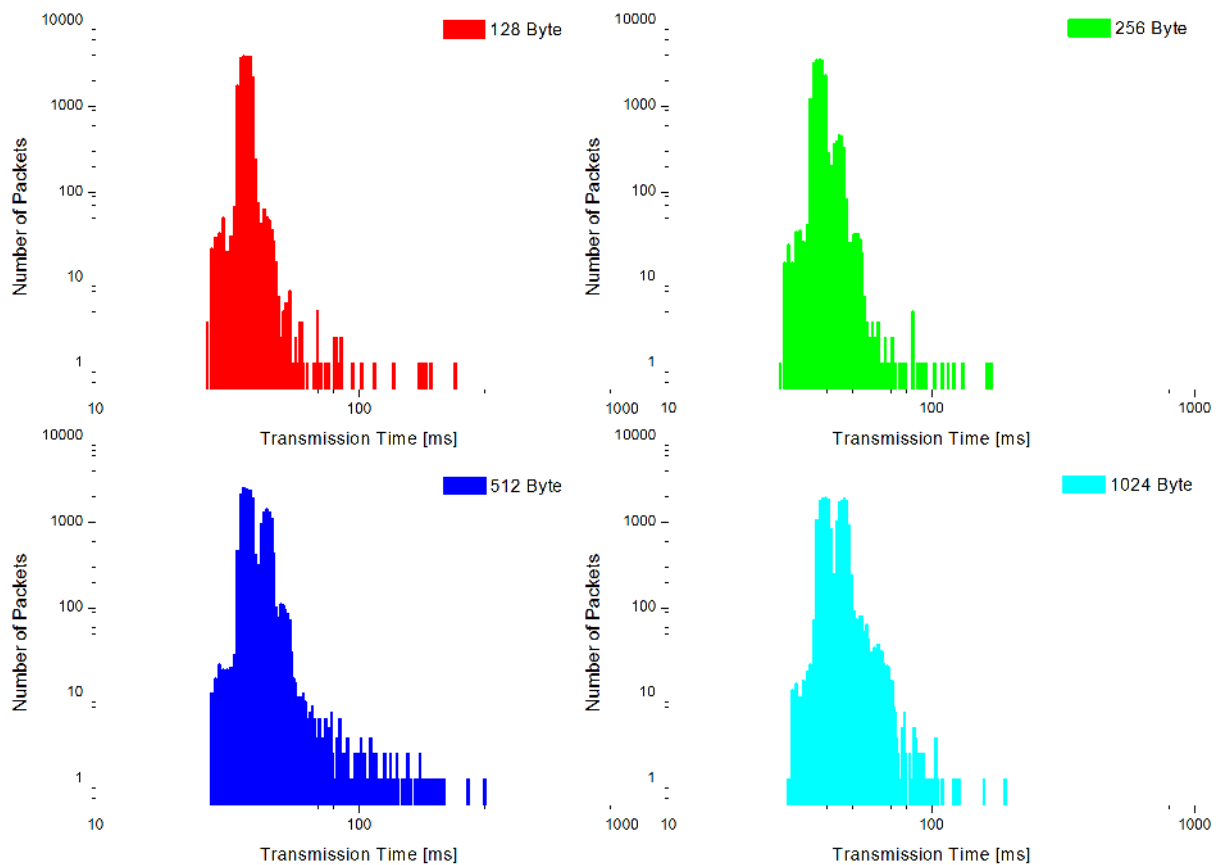


Abbildung 58 LTE: Histogramm der Übertragungszeit $T_{TI}=100$ ms

Tabelle 26: LTE: Statische Parameter der Übertragungszeit ($T_{TI}=100$ ms)

L_{Pkt} [Byte]	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N_{PL}	PLR
	Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
128	26,6	38,4	39,3	39,7	44,9	231,2	204,7	0	0,0 %
256	26,8	34,9	42,9	45,2	49,9	168,1	141,3	0	0,0 %
512	27,4	35,1	46,3	47,7	57,7	299,5	272,1	0	0,0 %
1024	28,9	36,4	48,1	49,5	64,0	190,1	161,2	63	0,3 %

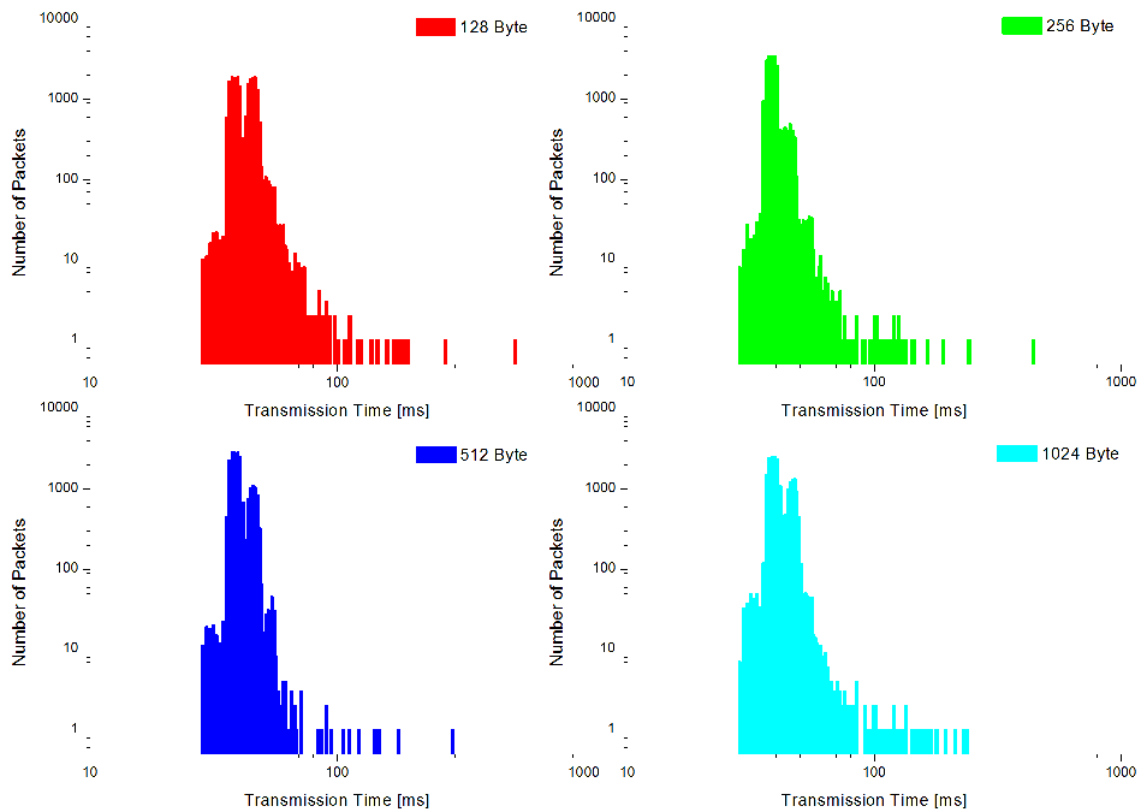


Abbildung 59 LTE: Histogramm der Übertragungszeit für $T_{TI}=250$ ms

Tabelle 27: LTE: Statische Parameter der Übertragungszeit ($T_{TI}=250$ ms)

L_{PKT} [byte]	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N_{PL}	PLR
	Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
128	28,3	36,1	47,5	48,9	59,8	523,1	494,8	15	0,1 %
256	28,2	37,2	44,2	46,4	53,5	439,3	411,1	1	0,0 %
512	28,3	37,3	46,5	47,4	50,9	292,5	264,1	0	0,0 %
1024	28,4	36,5	47,9	48,9	55,4	236,0	207,7	63	0,3 %

5.2.3.2 Sonstige Einflussgrößen

Die Wirkung von sonstigen Einflussgrößen wurde bei sogenannten Langzeittests untersucht. Die sonstigen Einflussgrößen lassen sich dadurch charakterisieren, dass diese durch den Anwender nicht beeinflussbar sind. Während der Langzeitmessungen wurde die Downlink-Richtung, die Übertragungsrichtung vom zentralen DIP zum dezentralen DEP (DIP-DEP) und die Uplink-Richtung, die Übertragungsrichtung vom dezentralen DEP zum zentralen DIP (DEP-DIP) betrachtet. In Abbildung 60 sind die gemessenen Werte der Kenngröße Übertragungszeit für die Downlink- und Uplink-Richtung dargestellt. Anhand von Abbildung 60 können tageszeitabhängige Einflüsse festgestellt werden. So treten am Mittwoch, Donnerstag, Freitag und Montag vermehrt höhere Übertragungszeiten in beiden Übertragungsrichtungen auf. Zudem tritt am Montag ein ungeklärter Effekt auf. Montag ab 12:00 Uhr ändert sich das Zeitverhalten in Uplink-Richtung (DEP-DIP) sprunghaft. Allerdings kann dieser Effekt in Downlink-Richtung (DIP-DEP) nicht festgestellt werden. Zudem hat die Analyse der Kommunikationsverbindung gezeigt, dass es keine Umschaltung im Übertragungspfad gibt. Die sprunghafte Änderung des Zeitverhaltens wird auch anhand der statischen Parameter in Tabelle 28 deutlich. Während sich die statistischen Parameter von Mittwoch bis Sonntag nur geringfügig ändern kommt es am Montag in Uplink-Richtung zu einem deutlichen Anstieg der statischen Parameter.

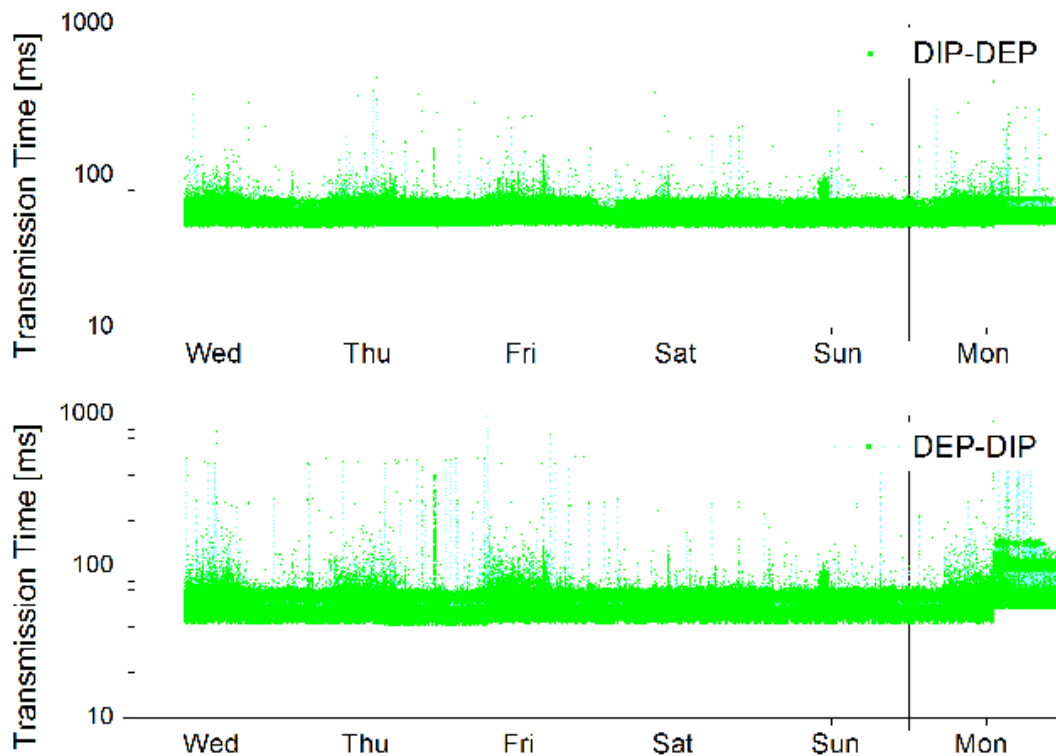


Abbildung 60: LTE: KW 13; Sendezeitabstand 500 ms, Nutzdatenlänge 128 Byte

Tabelle 28: LTE: Statische Parameter der Übertragungszeit für KW13

Tag	Rtg.	Statistische Parameter der Übertragungszeit [ms]							N _{PL}	PLR
		Min.	Mod.	P90	P95	P99	Max.	Span.		
Wed	Up.	41,4	48,0	62,8	66,5	73,9	780,1	738,7	0	0,0 %
	Do.	45,4	50,5	60,3	64,4	70,6	347,6	302,2	0	0,0 %
Thu	Up.	40,6	45,0	61,6	65,4	71,8	521,1	480,5	0	0,0 %
	Do.	45,5	50,9	58,9	62,7	69,4	447,1	401,6	0	0,0 %
Fri	Up.	40,4	47,8	63,4	66,7	74,2	42709,9	42669,5	162	0,1 %
	Do.	46,1	54,1	59,1	62,5	70,4	386,3	340,2	0	0,0 %
Sat	Up.	41,6	47,9	62,4	65,8	70,0	276,7	235,0	0	0,0 %
	Do.	45,4	52,8	57,4	59,5	67,4	366,1	320,7	0	0,0 %
Sun	Up.	41,7	48,4	62,4	65,8	70,6	516,8	475,1	0	0,0 %
	Do.	45,4	50,5	57,9	61,1	69,6	267,7	222,3	0	0,0 %
Mon	Up.	41,9	48,1	81,9	102,1	110,1	12463	12421,4	67	0,1 %
	Do.	45,6	51,3	59,3	61,3	70,3	421,8	376,2	0	0,0 %

Für einen weiteren Zeitraum sind die Messwerte der Übertragungszeit in Down- und Uplink-Richtung in Abbildung 61 dargestellt. In Abbildung 61 können ebenfalls tageszeitabhängige Einflüsse festgestellt werden. So treten von Dienstag bis Donnerstag und von Dienstag bis Mittwoch vermehrt höhere Übertragungszeiten in beiden Übertragungsrichtungen auf.

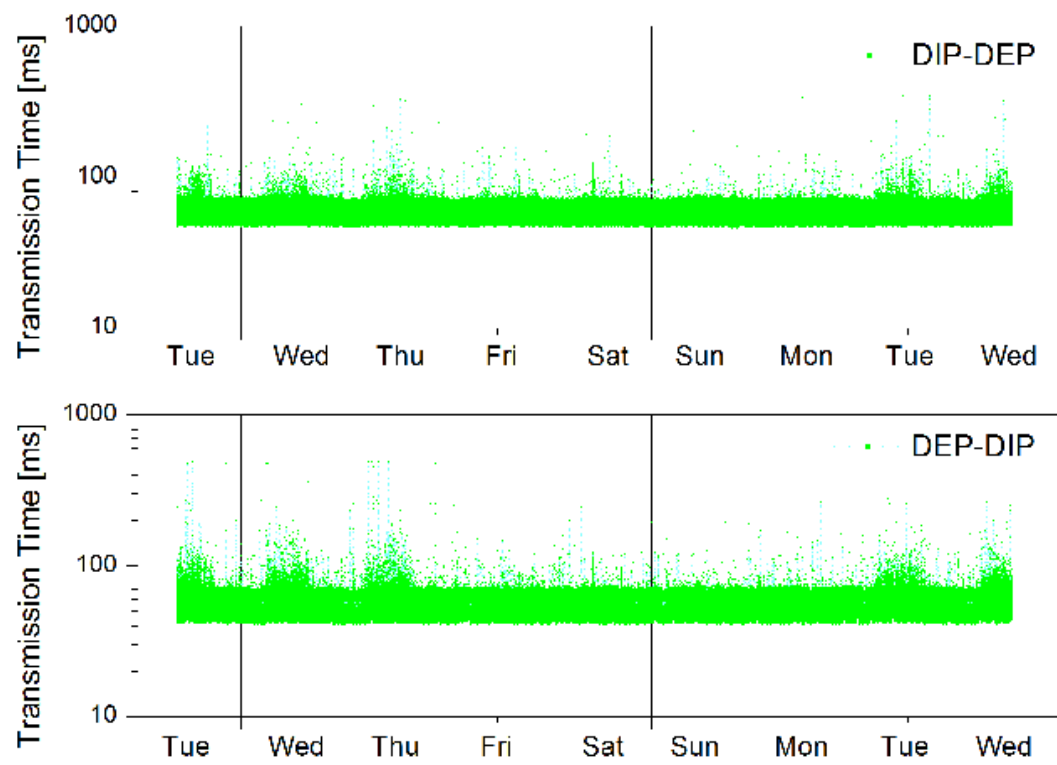


Abbildung 61: KW 14: Sendezeitabstand 500 ms, Nutzdatenlänge 128 Byte

6 Analyse und Optimierung der Applikationsprotokolle

6.1 Netzwerkschicht

6.1.1 Internet Protokoll Version 6

Bei Internet Protokoll der Version 6 (IPv6) wird ein hierarchisches Adressmodell eingeführt. Es werden die Adressierungsart Unicast – genau ein Empfänger, Anycast – ein Empfänger von vielen und Multicast – alle Empfänger von einem Bereich unterstützt. In Abbildung 62 ist der Paketaufbau des IPv6, gemäß RFC 2460 [47] abgebildet. Neben der erweiterten Anzahl an IP-Adressen (2^{128}) bietet das IPv6 Protokoll im Gegensatz zu IPv4 mehrere Felder um die Priorität des Datenverkehrs zu steuern und QoS-Parameter zu übertragen.

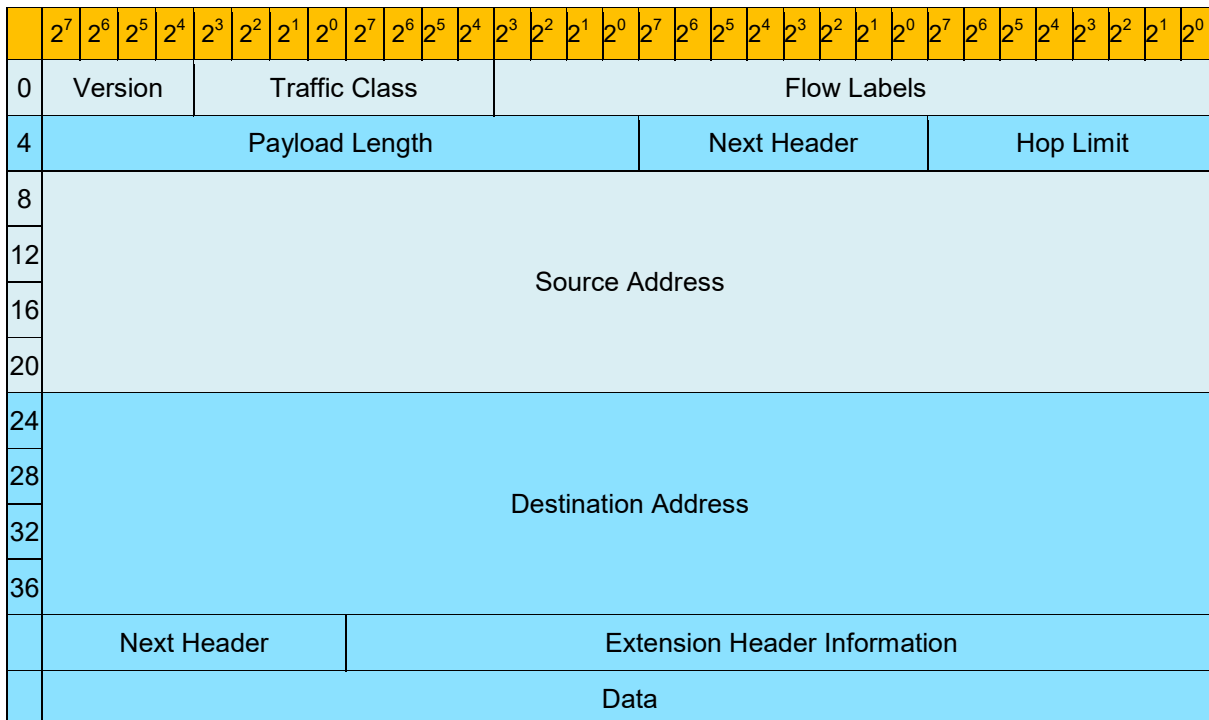


Abbildung 62: IPv6 Paketaufbau

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile des IPv6 Paketes gemäß RFC2460 [47] erläutert:

Im Versions-Feld des Paketheaders ist eine Kennung für das verwendete IP-Protokoll abgelegt. Für das IPv6 Protokollen ist der Inhalt des Feldes Version gleich 6 (Bin: 0110).

Neu beim IPv6 Protokoll ist das 8 Bit lange Feld "Traffic Class", dieses legt die Priorität in der Flussteuerung des IP-Paketes fest. Die Prioritätswerte lassen sich in zwei Gruppen aufteilen. Die Werte von 0 bis 7 stehen für Pakete, deren Übertragung sich bei hoher Netzwerkbelastung verlangsamen darf. Werte von 8 bis 15 hingegen signalisieren, dass ein Paket zu einer Echtzeitanwendung gehört und möglichst schnell weitergeleitet werden muss. Innerhalb einer Gruppe sind jeweils höhere Prioritätswerte wichtiger. Je nach Anwendung müssen Pakete unterschiedlich schnell von Quelle zu Ziel weitergeleitet werden. Der Sinn der Prioritätszahl ist es, den Routern in Überlastsituationen eine Entscheidung zu ermöglichen, welche Pakete zuerst weitergeleitet werden müssen und welche Pakete noch warten können. Für Sprachübertragen (Voice-over-IP) und echtzeitkritische M2M-Anwendung ist es entscheidend, dass die Datenpakete mit möglichst kurzen Verzögerungen (minimale Übertragungszeiten) übertragen werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Datenpaketen in Abhängigkeit von den Anforderungen der Automatisierungstechnischen M2M-Anwendung eine entsprechende „Traffic Class“ zuzuordnen. Allerdings sind bei der Verwendung der Traffic Class die folgenden Sachverhalte zu berücksichtigen:

- Die Service-Schnittstelle des Netzknotens zum IPv6-Service muss den Wert der Traffic Class Bits höheren Protokollschichten zur Verfügung stellen. Somit müssen die Werte der Traffic Class Bits auch von den höheren Protokollschichten erzeugt werden. Der Standardwert des Feldes Traffic Class sollte Null sein für alle 8 Bits.
- Es ist zu berücksichtigen, dass IPv6 fähige Netzknoten die Werte der Traffic Class Bits ändern können. Somit können Netzknoten die Traffic Class Werte in gesendeten, weitergeleiteten oder empfangenen Paketen ändern. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, dass nicht alle Netzknoten alle Traffic Class Bit Werte ändern dürfen.
- Es muss von höheren Protokollschichten berücksichtigt werden, dass die Traffic Class-Bit Werte des empfangenen Paketes möglicherweise nicht identisch mit den Traffic Class-Bit Werten des gesendeten Paketes sind.

In Tabelle 29 sind die bereits in [48] festgelegten Prioritätsklassen von IPv6 aufgelistet. Zudem erfolgt eine beispielhafte Zuordnung der Traffic Class zu typischen Datenverkehr bei M2M-Anwendungen.

Tabelle 29: Traffic Class Feld bei IPv6

Traffic Class	Beschreibung		Beispiel für M2M Anwendung
0	Nicht charakterisiert	Datenverkehr der sich bei Überlast verlangsamt	-
1	Hintergrundverkehr		-
2	zeitunkritische Datenübertragung (E-Mail)		Normalbetrieb und Diagnose Wartung bei Fernwartung und -überwachung Diagnose bei Fernwirkung
3	Reserviert		-
4	Massendatenverkehr (z.B.: FTP)		Inbetriebsetzung bei Fernwirkung, -wartung und - überwachung
5	Reserviert		-
6	Interaktiver Datenverkehr (z.B. Telnet)		-
7	Steuerdatenverkehr für Router und Switches (z.B. ICMP, SNMP, Routing)		-
8 - 15		Datenverkehr mit konstanter Übertragungsrate (Echtzeitanwendungen)	Normalbetrieb bei Fernwirkung

Das 20 Bit lange Feld Flow Label steht für die Flussnummer, zur der das Paket gehört. Für normale Pakete ist die Flussnummer Null erlaubt. Das Feld kann jedoch genutzt werden, um spezielle Verbindungen mit Quality-of-Service-Garantien aufzubauen. Es soll möglich sein, an einen Paketstrom zwischen Quelle und Ziel bestimmte Verzögerungsanforderungen zu stellen und Bandbreiten zu reservieren. Dazu bekommt der Paketstrom eine Nummer, die so genannte Flussnummer (Flow Label). Die Flussnummer und die Verbindungsanforderungen müssen an alle Router auf dem Weg zwischen Quell- und Zielhost mitgeteilt werden. Jeder Router muss die Anforderungen in einer internen Tabelle speichern und die Pakete mit Flow

Label ungleich Null entsprechend behandeln. Leider befindet sich das Feld zurzeit noch im Experimentierstadium und die Verwendung des Flow-Labels ist noch nicht genau definiert. Es könnte jedoch für bestimmte M2M-Anwendung äußerst interessant sein. Mit Hilfe des Flow-Labels-Feldes wäre es möglich, konkrete Forderungen an die Transportzeit von Paketen zu stellen und somit eines der bisher größten Probleme von Echtzeitanwendungen zu lösen. Die Router könnten anhand des Flow Labels und eines zusätzlichen Option Feldes mit einer gewünschten Ankunftszeit entscheiden, wie viel Zeit das Paket noch hat und dringende Pakete mit höherer Priorität weiterleiten.

Das Feld Nutzdatenlänge (Payload Length) ist 16 Bit lang und vom Type „Unsigned Integer“. Das Feld „Payload Length“ gibt die Länge der Nutzdaten in Oktett an. Der „Extended Header“ wird ebenfalls zur Länge der Nutzdaten gezählt.

Das Feld „Next Header“ identifiziert den Header, welcher auf den IPv6 Header folgt. Dabei werden die gleichen Werte wie beim Feld Protokoll (Protocol) des IPv4 Headers verwendet [49].

Der Wert im Feld Hop Limit wird bei jeder Weiterleitung um 1 erniedrigt, um die Lebensdauer von verirrtten Paketen zu beschränken.

Das Feld Source Address enthält die 128 Bit IP-Adresse der Station, die das Paket abgeschickt hat (Quell-IP-Adresse).

Das Feld Destination Address enthält die 128 Bit IP-Adresse der Station, für die das Paket bestimmt ist (Ziel-IP-Adresse).

6.1.2 Übergangsmechanismen

Während der Projektlaufzeit war es nicht möglich einen IPv6 fähigen drahtlosen Netzzugang zu erhalten und auch in naher Zukunft ist mit einem Parallelbetrieb von IPv4 und IPv6 zu rechnen. Aus diesem Grund ist es notwendig die möglichen Übergangsmechanismen zwischen IPv4 und IPv6 zu betrachten. Im Folgenden werden die wichtigsten Mechanismen des Parallelbetriebes der Typen Dual-Stack, Tunnel und Protokollübersetzer vorgestellt.

6.1.2.1 Dual-Stack

Dual-Stack Architektur

Bei der Dual-Stack Architektur (Abbildung 63) werden beide Internet-Protokoll Versionen (IPv4 und IPv6) in einem Rechner/Server parallel integriert.

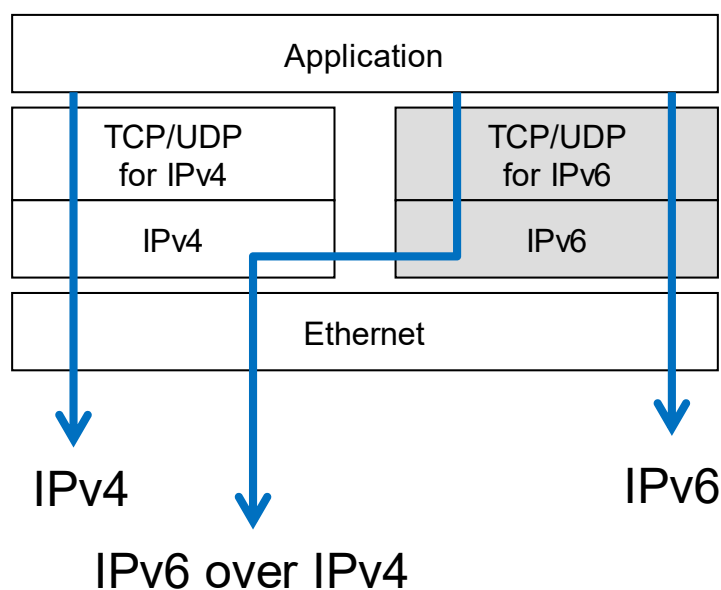


Abbildung 63: Dual-Stack Architektur

Jeder Netzwerkknoten benötigt dabei mindestens eine IPv4- und IPv6-Adresse, um mit dem IPv4 und IPv6 Netzwerk zu kommunizieren (siehe Abbildung 64).

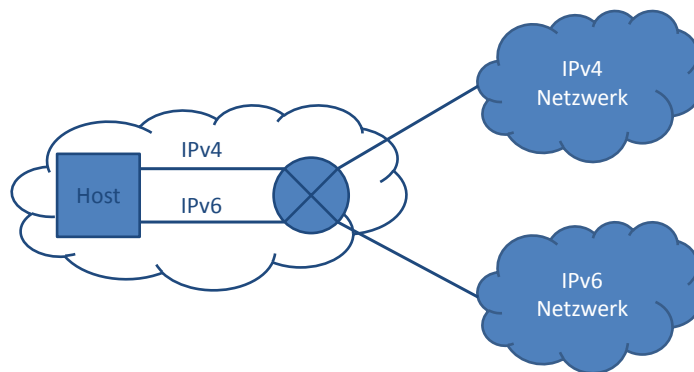


Abbildung 64: Gerät mit Dual-Stack Architektur

Nachteile:

- Jeder Router im Netzwerk muss beide Protokolle unterstützen
- Benutzung von beiden Protokollversionen benötigt doppelten Administrationsaufwand (Routing-Tabellen, Security-Konzepte)
- IPv4 benutzt ARP und IPv6 verwendet spezielle Multicast Pakete
- Nicht genug IPv4 Adressen vorhanden

Dual-Stack Lite

Bei der Dual Stack Lite (DS-Lite) Architektur (Abbildung 65) wird dem Host nur eine global routebare IPv6-Adresse zugewiesen. Das IPv4-Paket mit privater IP Adresse wird im Router (Customer Premises Equipment, kurz CPE) zunächst in ein IPv6-Paket gekapselt. Dieses wird dann über die IPv6-Verbindung des CPE in das Netz des Internet Service Providers transportiert, wo das IPv6-Paket entpackt und das ursprüngliche IPv4-Paket (mit privater IP-Adresse) wiederhergestellt wird. Danach wird die private IPv4-Adresse per Carrier-grade NAT in eine öffentliche IPv4-Adresse geändert und das Paket wird in das Internet geroutet. Das Carrier-grade NAT identifiziert Sitzungen eindeutig mittels Aufzeichnungen über die öffentliche IPv6-Adresse des CPE, die private IPv4-Adresse und TCP- oder UDP-Portnummern.

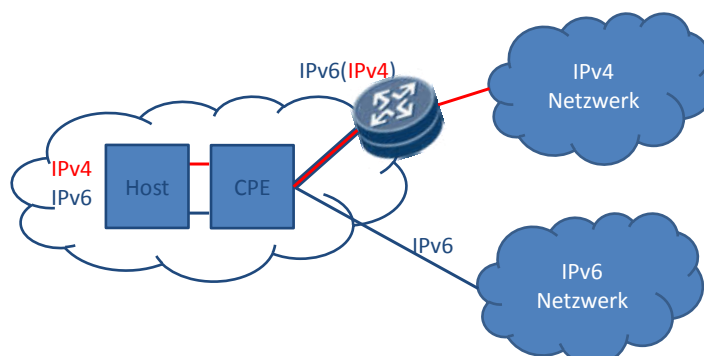


Abbildung 65: Dual-Stack-Lite Architektur

Diese DS-Lite-Umsetzung führt allerdings beim Endkunden zu einem Problem: Es sind keine IPv4-basierenden Portfreigaben mehr möglich, da die Pakete an die öffentliche IP-Adresse bereits beim Provider ausgefiltert werden. Dienste, die an einem DS-Lite-Anschluss angeboten werden, können also von Geräten, die keine IPv6-Verbindungen aufbauen können, nicht erreicht werden.

6.1.2.2 Tunnel Mechanismen

4in6 and 6in4

4in6 and 6in4 sind statische Tunnel-Mechanismen, in welchen das IPv4/IPv6 gekapselt in einem IPv6/IPv4 Paket übertragen wird. Bei 6in4 wird im IPv4 Header das Feld Protokoll auf 41 gesetzt, was eine Verkapselung von IPv6- in IPv4-Pakete signalisiert. Direkt im Anschluss an den IPv4 Header folgt das IPv6 Paket (siehe Abbildung 66).

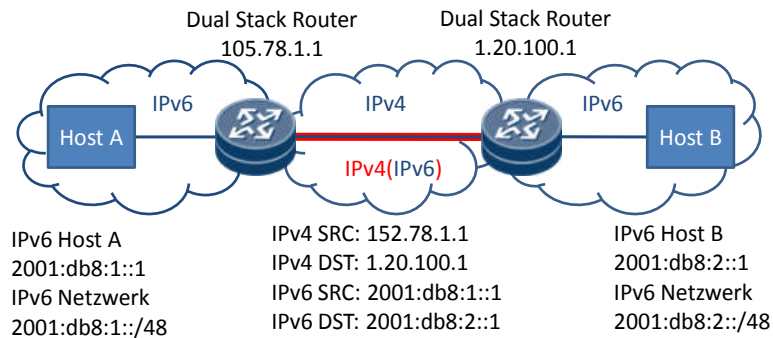


Abbildung 66: 6in4 Tunnel-Mechanismus

Der 4in6 Tunnel in Abbildung 67 ist ähnlich dem 6in4 Tunnel. Er wird verwendet um in IPv6 Netzwerken mit IPv4 Rechner zu kommunizieren.

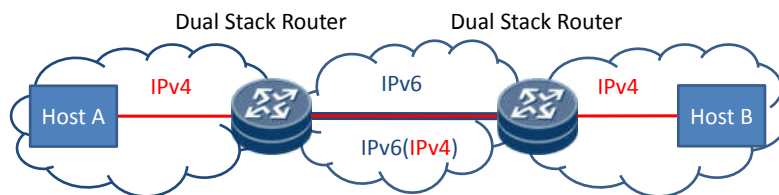


Abbildung 67: 4in6 Tunnel-Mechanismus

Bei den Tunnel Mechanismen 4in6 und 6in4 müssen die Adressen der HOST und Router manuell konfiguriert werden.

6to4

Der 6to4 Mechanismus ist in RFC 3056 [50] definiert und erlaubt die IPv6 Kommunikation in IPv4 Netzwerken. In der IPv6 Adresse wird der spezieller Präfix 2002::/16 verwendet. Die folgenden 4 Byte enthalten die IPv4 Adresse des Endpunktes. Das Ergebnis ist ein 2002:abcd:efgh::/48 Netzwerk, mit ab, cd, ef und gh als Hexadezimal-Darstellung der IPv4-Adresse. Die Verbindung der 6to4 Hosts mit dem IPv6 Netzwerk wird mit sogenannten 6to4 Relais erreicht. Dies Relais sind unter speziellen Anycast Adressen erreichbar 192.88.99.1 oder 2002:c058:6301::. In Abbildung 68 sind die 6to4 Komponenten und die Adressierung abgebildet.

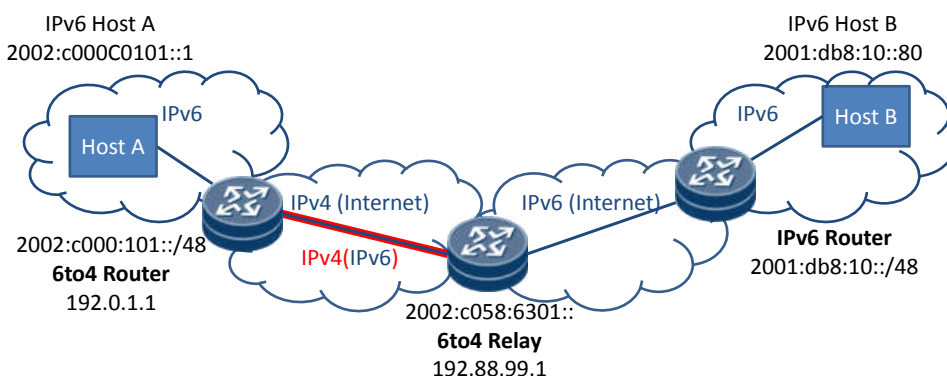


Abbildung 68: 6to4 Adressierung

Der 6to4 Mechanismus hat folgende Nachteile:

- 6to4-Router müssen alle Pakete von 6to4-Relay-Router akzeptieren
- 6to4-Relay-Router müssen Pakete von 6to4-Routern und IPv6-Hosts ohne Überprüfung akzeptieren
- Sicherheitsnachteile

Bei den Sicherheitsnachteilen handelt es sich um:

- Schutz vor DoS/DDoS gegen 6to4 Komponenten nicht verfügbar
- 6to4 Router/Relay-Routers können für DDoS Attacken verwendet werden
- "Service theft": Unautorisierte Verwendung der Relay-Router Dienste
- Broadcast Attacken an lokale IPv4 Adressen
- Neighbor Discovery Attacken

IPv6 rapid deployment (6rd)

6rd basiert auf 6to4 und im [51] definiert. Im Gegensatz zu 6to4 benutzt 6rd jedoch keinen speziellen Adressbereich, sondern den IPv6-Adressbereich des Providers. Somit sind die verwendeten Relay Router unter der Kontrolle der Provider.

Teredo

Teredo ist ein Tunnel Mechanismus und basiert auf UDP Kommunikation, ebenfalls ist Teredo unter der Bezeichnung IPv4 Network Address Translator (NAT) Traversal (NAT-T) für IPv6 bekannt. Die IPv6 Pakete werden in UDP-Paketen übertragen. Der Teredo Tunnel Mechanismus ist in [52] definiert. Der Vorteil dieses Tunnels ist das dieser hinter einem NAT-Router arbeitet. Der Teredo-Client bekommt vom Teredo-Server seine Adresse. Die Kommunikation wird über ein zusätzliches Teredo-Relay realisiert. Dieses Teredo-Relay benötigt dafür ein Standard IPv6-Verbindung. Der Teredo Tunnel Mechanismus ist in Abbildung 69 dargestellt.

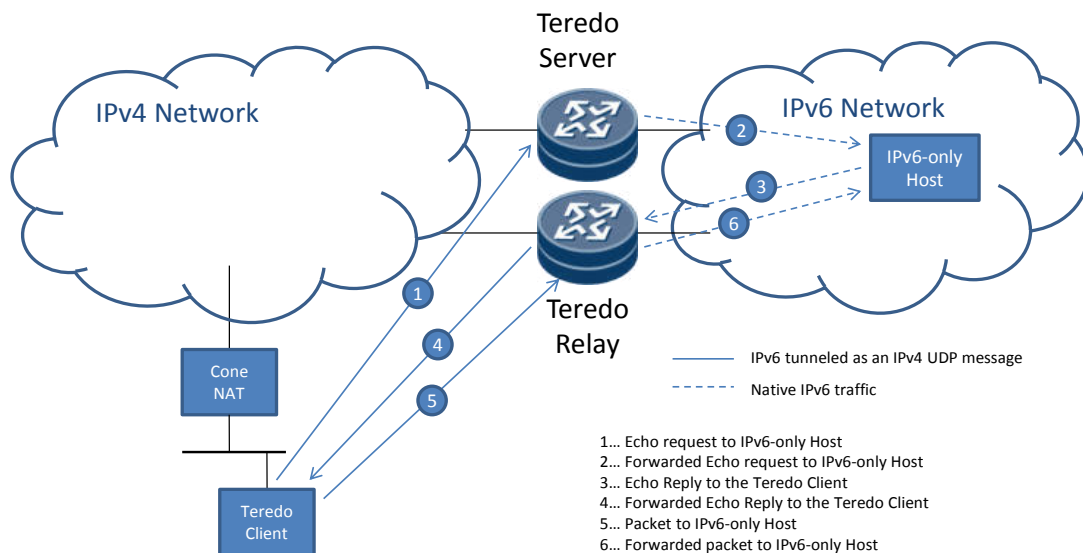


Abbildung 69: Teredo Tunnel Mechanismus

Für Teredo sind folgende Komponenten notwendig:

Teredo Client

- Ein IPv4/IPv6 Netzknoten mit einer Teredo Tunnel Schnittstelle, durch welche Datenpakete zu anderen Teredo Clients (Host-to-Host Tunnel) oder zu Netzknoten im IPv6 Netzwerk über ein Teredo Relay (Host-to-Router Tunnel) übertragen.

Teredo Server

- Ein IPv4/IPv6 Netzwerkknoten, welcher mit dem IPv4 Netzwerk und dem IPv6 Netzwerk verbunden ist. Der Teredo Server unterstützt die Anfangskonfiguration von Teredo Clients und die Anfangskonfiguration entweder zwischen Teredo Clients oder Teredo Clients und IPv6-only Host.

Teredo Relay

- Ein IPv4/IPv6 Router, welcher Host-to-Router und Router-to-Host Tunnel für die Weiterleitung von Datenpaketen zwischen Teredo Clients in IPv4 Netzwerken und IPv6-Only Host verwendet.

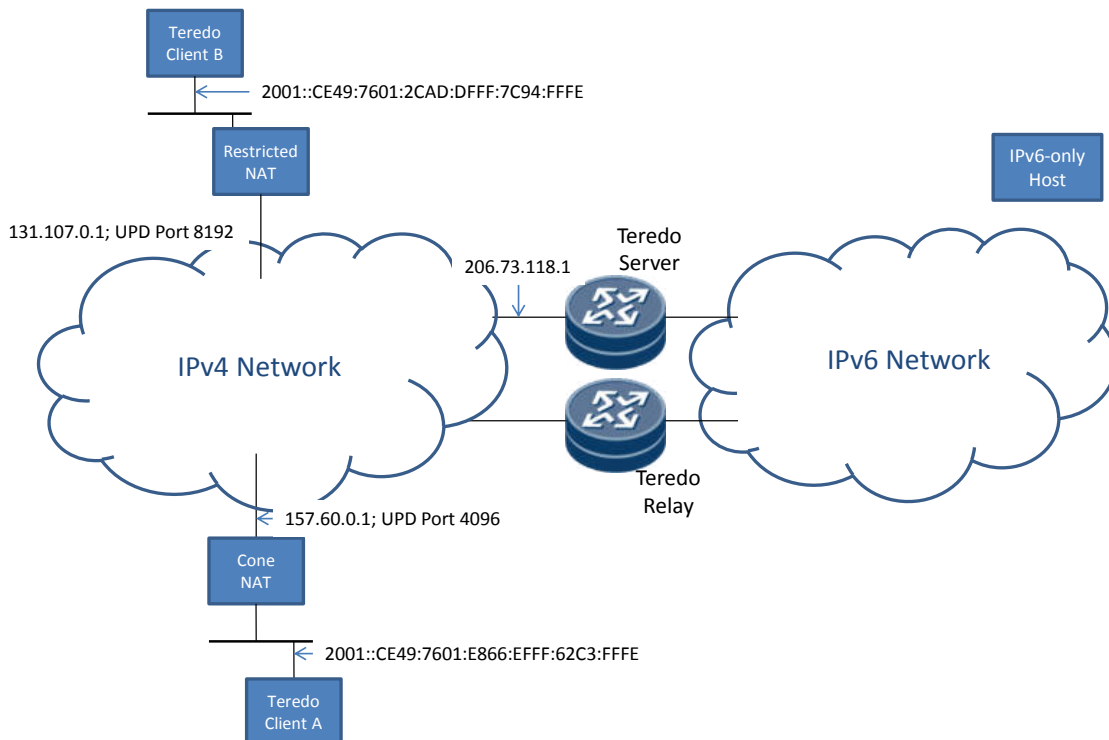


Abbildung 70: Teredo Adressierungsbeispiel

Das Teredo Adressierungsbeispiel aus Abbildung 70 ist folgendermaßen aufgebaut:

Teredo Client A:

- Öffentliche IPv4 Adresse des Teredo Server: 206.73.118.1 (CE:49:76:01)
- Externe Adresse für den Teredo Datenverkehr: 157.60.0.1 (9D:3C:00:01); UDP Port 4096
- Teredo Client A Adresse:
 - Teredo Präfix: 2001::/32
 - IPv4-Adresse des Teredo Servers: CE49:7601
 - Flags: E866
 - versteckte Version des UDP-Port 4096: EFFF
 - versteckte Version der öffentlichen IP-Adresse des Cone NAT: 62C3:FFFE

Teredo Client B:

- Öffentliche IPv4 Adresse des Teredo Server: 206.73.118.1 (CE:49:76:01)

- Externe Adresse für den Teredo Datenverkehr: 131.107.0.1 (9D:3C:00:01); UDP Port 8192
- Teredo Client A Adresse:
 - Teredo Präfix: 2001::/32
 - IPv4-Adresse des Teredo Servers: CE49:7601
 - Flags (Signalisierung das Client B hinter einem Restricted NAT ist): 2CAD
 - versteckte Version des UDP-Port 9192: DFFF
 - versteckte Version der öffentlichen IP-Adresse des Restricted NAT: 7C94:FFFE

6.1.2.3 Protokollübersetzung

Stateless IP/ICMP Translation (SIIT)

SIIT ist ein zustandsloser Protokollübersetzungsmechanismus für IP und ICMP Pakete. Zustandslos bedeutet, dass jedes Paket übersetzt wird ohne den Kontext zu speichern. Eine wichtige Anforderung an SIIT ist, das IPv4 und IPv6 Adressen aufeinander abgebildet werden könne. Dafür werden spezielle IP-Adresse, die sogenannten IPv4-translated IPv6 Adressen zugewiesen. Diese Adressen sind in der Form „::FFFF:192.168.0.1“, welche aus eine Folge von 80 Bits mit Inhalt „0“ gefolgt von 16 Bits mit Inhalt „1“ bestehen. Danach folgen 32 Bits in welchen die IPv4 Adresse enthalten ist. Die Protokollübersetzung erfolgt in sogenannten SIIT-Boxen, diese ist ein Softwarebestandteile eines Routers zwischen IPv4 und IPv6 Netzwerken. Eine detaillierte Beschreibung des Protokollübersetzungsmechanismus ist in [53] beschrieben. Für die Kommunikation eines IPv4 Host über einen SIIT Router mit einem IPv6 Host, ist für die Zeitspanne der Kommunikationsverbindung eine eindeutige IPv4 Adresse am IPv6 Host notwendig. Über diese eindeutige IPv4 Adresse erfolgt der Verbindungsaufbau. Jeder IPv6 Host mit einer Kommunikationsverbindung zu einem IPv4 Host benötigt eine temporäre eindeutige IPv4 Adresse. Wenn die Kommunikationsverbindung über ein öffentliches Netzwerk wird eine weltweit eindeutige IPv4 Adresse benötigt. Die SIIT Protokollübersetzung ist in Abbildung 71 exemplarisch dargestellt.

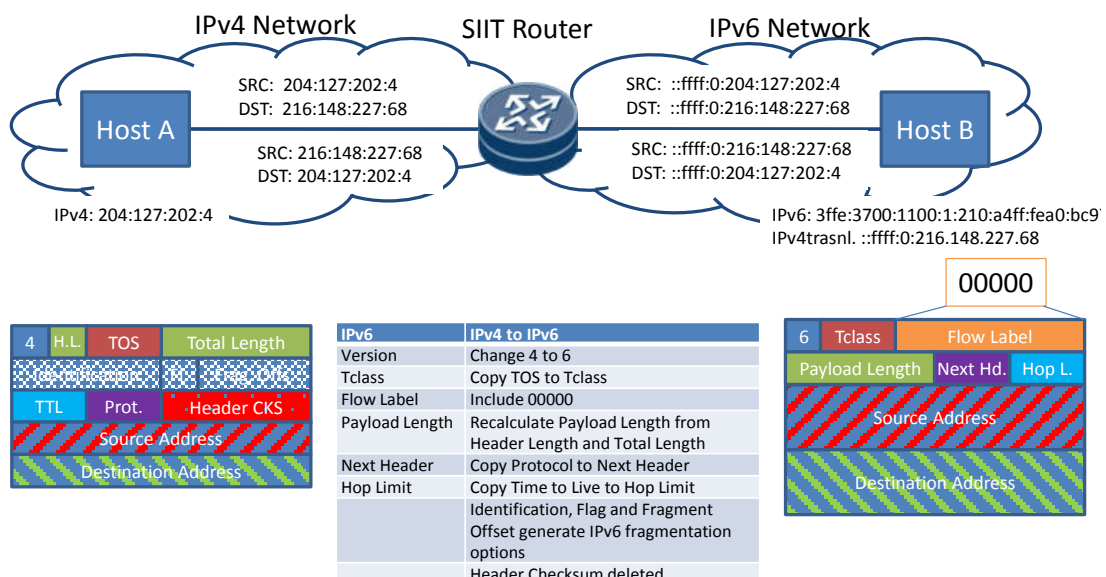


Abbildung 71: SIIT - Stateless IP/ICMP Translation

Nat64/DNS64

NAT64 ist ein Protokollübersetzungsmechanismus welcher für IPv6 Netzwerke entwickelt wurde und die Kommunikation mit IPv4 Servern in IPv4 Netzwerken unterstützt. NAT64 ist in der Lage IPv6 basierte TCP und UDP Anwendungen mit IPv4 basierten zu verbinden. Im

Gegensatz zu SIIT sind keine IPv4 Routing Infrastruktur in den IPv6 Netzwerken und keine Veränderungen am IPv6 Host notwendig. Die einzige Anforderung für die Verwendung von NAT64 ist ein modifizierter DNS Server (DNS64 Server). Wenn ein IPv6 Host sich mit einem IPv4 Host verbindet erhält er eine lokale IPv6 Adresse vom DNS64 Server. Diese IPv6 Adresse enthält die IPv4 Adresse in den niedrigsten 32 Bit. Das Adressformat von NAT64 Adressen ist 64:ff9b::/96. Dieses Netzwerk ist reserviert für den NAT64 Mechanismus. Pakete, welche diese Adresse als Zieladresse (Destination Address) enthalten, werden zum NAT64 Server geroutet. Damit verbindet sich der IPv6 Host mit dem Relay. Der NAT64 Server extrahiert die IPv4 Adresse und baut ebenfalls eine Verbindung auf. Nach dem Verbindungsaufbau können TCP und UDP Pakete übertragen werden.

Der Verbindungsaufbau sollte vom IPv6 Host initiiert werden. Vom IPv4 Host ist zwar ein spezieller Verbindungsaufbau möglich, aber der Hauptzweck von NAT64 ist die Kommunikation mit existierenden IPv4 Servern. Es sind mit NAT64 nur bidirektionale Verbindungen möglich, Multicast kann nicht realisiert werden.

6over4

6over4 ist ein Protokollübersetzungsmechanismus für die Kommunikation zwischen Dual-Stack Host in IPv4 Netzwerken. Es basiert auf IPv4 Multicast, insoweit es vom Netzwerk unterstützt wird. An jedem Host wird eine virtuelle Schnittstelle mit IPv6 Adresse erzeugt, welche sich von der IPv4 Adresse ableitet. Die IPv4 Adresse ist in den untersten 32 Bits der IPv6 Adresse enthalten. 6over4 benutzt das Adressformat fe80::/96, z.B. wird die IPv4 Adresse 192.168.0.1 in fe80::c0a8:1 umgewandelt. Die IPv6 Neighbor-Discovery Funktionen verwenden einen speziellen Multicast für die Ethernet Adressauflösung. Dies Multicast Adressen werden in IPv4 Multicast Adressen umgewandelt. Zum Beispiel ff02::1 (IPv6 Multicast Adresse für alle Host) wird in 239.192.0.1 umgewandelt. Die IPv4 Multicast Adresse wird zu 239.192.a.b, wobei a und b die letzten zwei Bytes der IPv6 Multicast Adresse entsprechen. Die Nachteile von 6over4 ist, dass das verwendete IPv4 Netzwerk Multicast-Dienste vollständig unterstützen muss. In normalen IPv4 Netzen ist das meist nicht der Fall.

Intra-Site Automatic Tunnel Addressing Protocol

Intra-Site Automatic Tunnel Addressing Protocol (ISATAP) gemäß [54] ist eine automatischer Tunnelmechanismus für die Adresszuweisungen und Host-zu-Host, Host-zu-Router und Router-zu-Host Kommunikation, dafür sorgen Unicast IPv6 Verbindungen zwischen IPv6/IPv4 Host über ein IPv4 Netzwerk. ISATAP ist im RFC4214 beschrieben. Der große Vorteil von ISATAP ist, dass die Hosts keine manuelle Konfiguration benötigen

ISATAP Adressen verwenden die lokal administrierte Schnittstelle, welche entweder durch ::0:5EFE:a.b.c.d (a.b.c.d entspricht der privaten IPv4 Unicast Adresse) oder durch ::200:5EFE:w.x.y.z (w.x.y.z entspricht der öffentlichen IPv4 Unicast Adresse) identifiziert werden. Die ISATAP Schnittstellenbezeichnung kann mit jedem 64-Bit Präfix, welche für IPv6 Unicast Adressen gültig ist, inklusive „Link-Local“ (FE80::/64), „Unique Local“ und globalen Präfixes kombiniert werden.

Ein Teil der Schnittstellenbezeichnung der ISATAP-Adresse enthält eine eingebettete IPv4 Adresse, welche verwendet wird um die IPv4 Zieladresse im IPv4-Header festzulegen, wenn der ISATAP adressierte IPv6 Verkehr wird über das IPv4 Netzwerk getunnelt.

In den Abbildung 72 und Abbildung 73 sind Beispielkonfigurationen mit entsprechender Adressierung abgebildet.

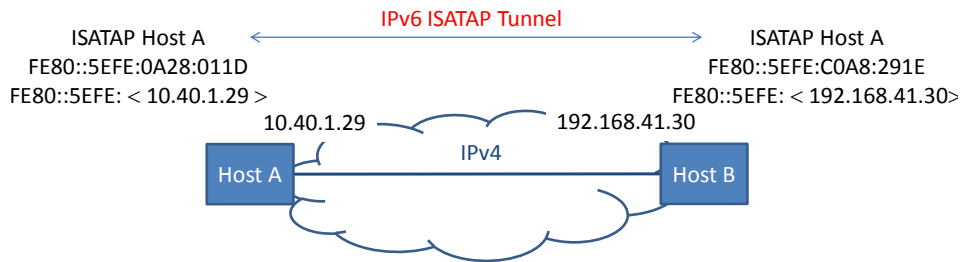


Abbildung 72: ISATAP Konfiguration zwischen zwei IPv6 Host

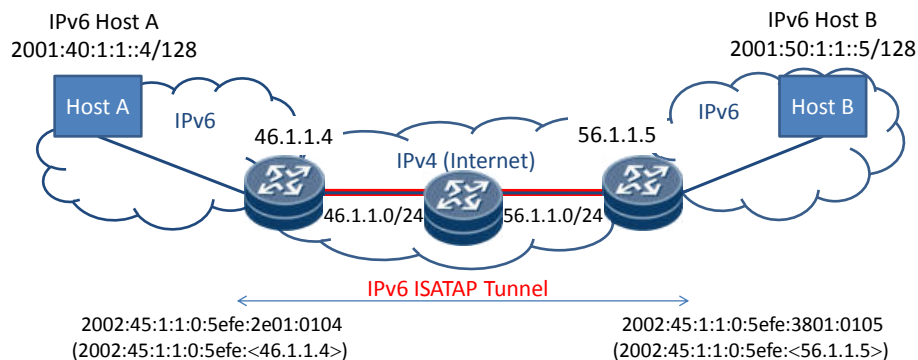


Abbildung 73: ISATAP Tunnel über eine IPv4 Insel

6.1.3 Zusammenfassung

Mit der Einführung des Internets Protokolls der Version 6 stehen M2M-Anwendern Parameter für eine höhere Dienstgüte (QoS) zur Verfügung. Diese müssen höheren Protokollschichten, speziell der Anwendungsschicht, zur Verfügung gestellt werden. Zudem müssen die höheren Schichten die QoS Parameter entsprechend Parametrieren. Da in naher Zukunft nicht mit einer flächendeckenden Verbreitung von IPv6 zu rechnen ist, müssen sich M2M-Gerätehersteller und M2M-Anwendungsentwickler mit dem Parallelbetrieb von IPv4 und IPv6 Netzwerken beschäftigen. Welche der in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Übergangsmechanismen sich durchsetzen wird ist fraglich. Da die meisten Übergangsmechanismen einen starken akademischen Bezug haben. Das größte Potential bietet der Dual-Stack in M2M-Geräten. Da mit dem Dual-Stack die M2M-Geräte problemlos in IPv4 und IPv6 Netzwerken arbeiten.

6.2 Anwendungsprotokolle

M2M-Kommunikation über Mobilfunknetze zeichnet sich durch verlustbehaftete Übertragungskanäle aus. Aus diesem Grund werden zunehmend spezialisierte M2M-Protokolle entwickelt bzw. befinden sich bereits im Einsatz. Bei der Entwicklung und Implementierung derartiger Protokolle muss weiterhin darauf Rücksicht genommen werden, dass es sich bei den Endgeräten häufig um ressourcenbeschränkte Systeme handelt. Daher wurden daher drei typische Vertreter von M2M-Applikationsprotokollen analysiert. Dabei handelt es sich um:

- OPC Unified Architecture (OPC UA): OPC UA ist eine Implementierung einer service-orientierten Architektur, welche zunehmend in industriellen Automatisierungssystemen eingesetzt werden. OPC UA zeichnet sich durch seine hohe Skalierbarkeit aus, so dass es auch in sehr ressourcenbeschränkten Systemen eingesetzt werden kann.

- **Constrained Application Protocol (CoAP):** Mit CoAP soll ein leichtgewichtiges Protokoll für die Integration von Sensoren und Aktoren in die existierende Internet-Infrastruktur geschaffen werden. Es basiert auf der REST-Architektur, sodass das HTTP-Protokoll mit seinen Methoden zum Datenaustausch genutzt werden kann. Allerdings benutzt CoAP UDP als Transportprotokoll, um den Protokolloverhead und das aufwändige Verbindungsmanagement von TCP zu umgehen.
- **Message Queuing Telemetry Transport (MQTT):** MQTT wurde ebenfalls für ressourcenbeschränkte Systeme entwickelt und basiert auf dem Publish/Subscribe-Kommunikationsmuster. Wie auch OPC UA basiert MQTT auf dem TCP-Protokoll, jedoch ist sein Overhead deutlich geringer, da MQTT keine zusätzlichen Transportprotokolle wie SOAP oder HTTP nutzt.

Die Kernkomponente des zur Protokollanalyse verwendeten Testaufbaus ist ein Anritsu MD8475A Emulator für GSM (2G), UMTS (3G) und LTE (4G). In dieser Labortestumgebung können reproduzierbare Messungen durchgeführt werden. Einflüsse, wie sie in realen Netzen vorkommen, wie z.B. sich ändernde Empfangs-/Sendebedingungen, Zellauslastung, Wegverluste oder Interferenzen können so ausgeschlossen werden.

Die Testumgebung wurde genutzt, um die Übertragungszeit zwischen einer Datenquelle und der entsprechenden Datensenke in Korrelation zur Länge der übertragenen Nutzdaten zu messen. Letztere wurde zwischen 0 und 10.000 Bytes mit einer Schrittgröße von 100 Bytes angepasst. Die Messungen wurden 100-mal pro Nutzdatenlänge wiederholt. Im Sinne von M2M Kommunikation entsprechen die Datenquellen verteilten Geräten wie Smart Meters und die Datensenken agieren als Datenintegrationspunkte wie z.B. Steuer- und Kontrollanwendungen. Zur Durchführung der Messungen wurden die Datenquellen über einen Mobilfunkrouter an die Mobilfunk-Schnittstelle des Emulators angeschlossen. Die Datensenke wurde mit der Ethernet-Schnittstelle des Emulators verbunden. Der Testaufbau für die verschiedenen Protokolle ist in Abbildung 74 und Abbildung 75 dargestellt.

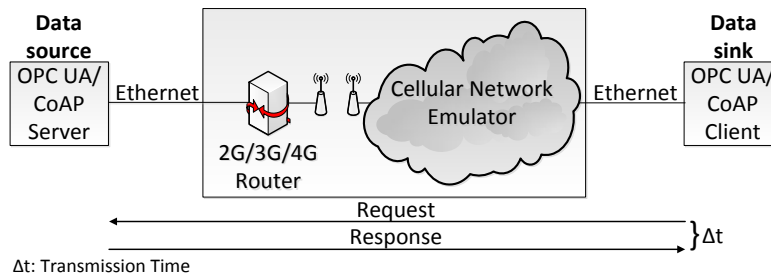


Abbildung 74: Messaufbau für OPC UA und CoAP

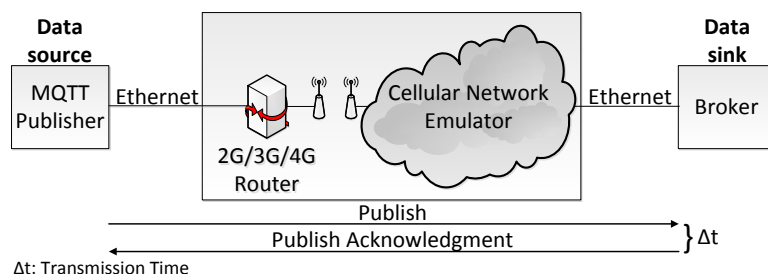


Abbildung 75: Messaufbau für MQTT

In Tabelle 30 sind die wichtigsten verwendeten Parameter des Emulators für die drei verschiedenen Mobilfunkstandards angegeben.

Tabelle 30: Parameter des Mobilfunkemulators

EDGE		UMTS		LTE	
DL Slots	3	Duplex Modus	FDD	Duplex Modus	FDD
UL Slots	1	DL Paketfenstergröße	512 Bytes	DL Bandbreite	5 MHz
Kodierung	MCS-9	UL Paketfenstergröße	256 Bytes	UL Bandbreite	5 MHz
		DL Paketrate	384 kByte/s	Scheduling Modus	Statisch
		UL Paketrate	64 kByte/s		
DL: Downlink; UL: Uplink; FDD: Frequency Division Multiplex					

Die Messergebnisse für die untersuchten Protokolle sind in Abbildung 76, Abbildung 77 und Abbildung 78 gezeigt.

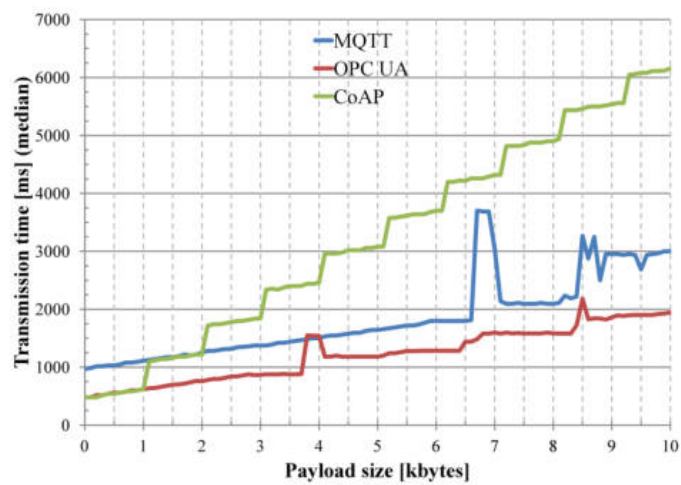


Abbildung 76: Messergebnisse für EDGE

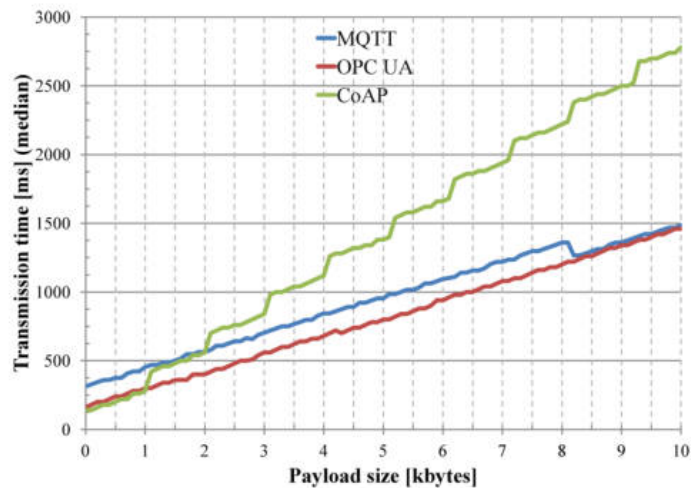


Abbildung 77: Messergebnisse für UMTS

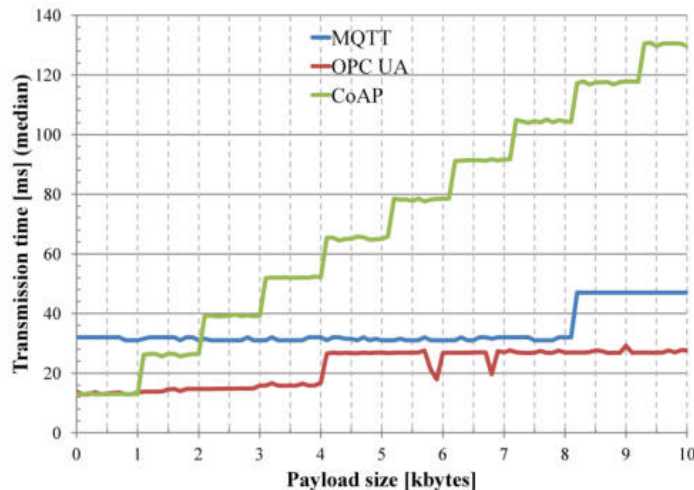


Abbildung 78: Messergebnisse für LTE

Bei der Auswertung der Ergebnisse sind insbesondere die folgenden Punkte aufgefallen:

Periodische Spitzen in den Übertragungszeiten:

Dieses Phänomen trat bei den TCP-basierten Protokollen OPC UA und MQTT über EDGE und UMTS auf, LTE war nicht betroffen. Wie in Abbildung 79 zu sehen ist, treten die Spitzen bei bestimmten Nutzdatenlängen in sehr kurzen Intervallen auf. Eine Analyse der Ursachen soll in zukünftigen Arbeiten durchgeführt werden.

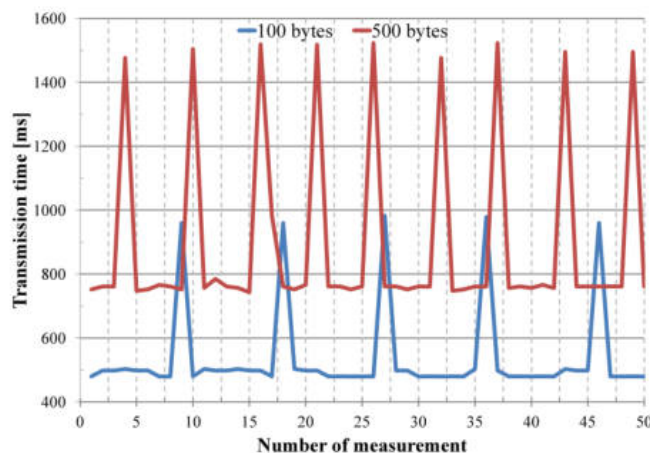


Abbildung 79: Periodische Spitzen in der Übertragungszeit (hier bei OPC UA über EDGE)

Im Gegensatz zu CoAP bleiben bei MQTT und OPC UA über LTE die Übertragungszeiten weitestgehend konstant:

In LTE werden die über die Luftschnittstelle übertragenen Daten in sogenannte Transportblöcke unterteilt. Die Größe dieser Blöcke wird von der LTE Basisstation festgelegt (bzw. vom Emulator in diesem Fall). Wenn die Größe eines Transportblocks größer ist als die eines vom mobilen Endgerät gesendeten IP-Pakets, fügt LTE mehrere IP-Pakete zusammen, bevor diese über die Luftschnittstelle übertragen werden. Daher können bei den TCP-basierten Protokollen MQTT und OPC UA mehrere Pakete gleichzeitig über die Luftschnittstelle übertragen werden. Dies ist möglich, da in TCP aufgrund des Empfangsfensters mehrere aufeinanderfolgende Pakete gesendet werden können, ohne auf die entsprechenden Empfangsbestätigungen zu warten. Dahingegen verwendet CoAP UDP als Transportprotokoll und nutzt einen eigenen Paketbestätigungsmechanismus ohne Empfangsfenster. Daher muss bei jedem Paket auf den Eingang der entsprechenden

Empfangsbestätigung gewartet werden, bevor das jeweils nächste Paket gesendet werden kann. Die zur Verfügung stehenden Kapazitäten innerhalb der Transportblöcke verbleiben dabei ungenutzt.

7 Labortestumgebung

Im Rahmen des Projektes ist eine Testumgebung geschaffen worden, die es erlaubt, die Kommunikationsstrecke zwischen Datenintegrationspunkt (DIP) und Datenendpunkt (DEP) unter Laborbedingungen zu simulieren. Dabei können die Parameter der drahtgebundenen (Internet) als auch der drahtlosen (Mobilfunk) Verbindung beeinflusst werden. Der Aufbau der Testumgebung ist in Abbildung 80 gezeigt.

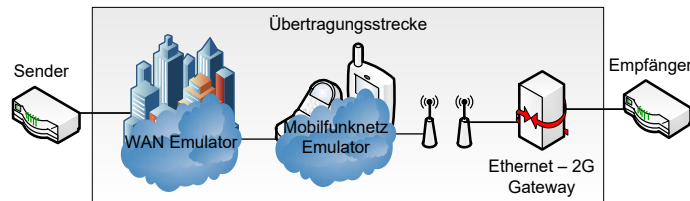


Abbildung 80: Labortestumgebung

Bei dem WAN Emulator handelt es sich um das Produkt PacketStorm1800E der Firma PacketStorm Communication. Mittels dieses Gerätes lassen sich typische Eigenschaften eines paketorientierten Netzwerkes wie Paketverluste und Verzögerungszeiten reproduzierbar für die Teststrecke nachbilden.

Als Mobilfunknetz Emulator werden die Geräte MD8470 und MD8475 der Firma Anritsu eingesetzt. Die Geräte bilden die Funktionalitäten einer Mobilfunk-Basisstation nach und lassen sich in allen relevanten Parametern wie Frequenz, Kodierungsschema, Signalstärke konfigurieren.

Mit der Labortestumgebung lässt sich der komplette Kommunikationskanal zwischen Sender und Empfänger nachstellen, die dabei durchlaufenden Protokolle sind in Abbildung 81 dargestellt. Es sei allerdings angemerkt, dass das Kernnetz der Mobilfunkbetreiber (siehe Abbildung 20) von der Labortestumgebung nicht abgedeckt wird.

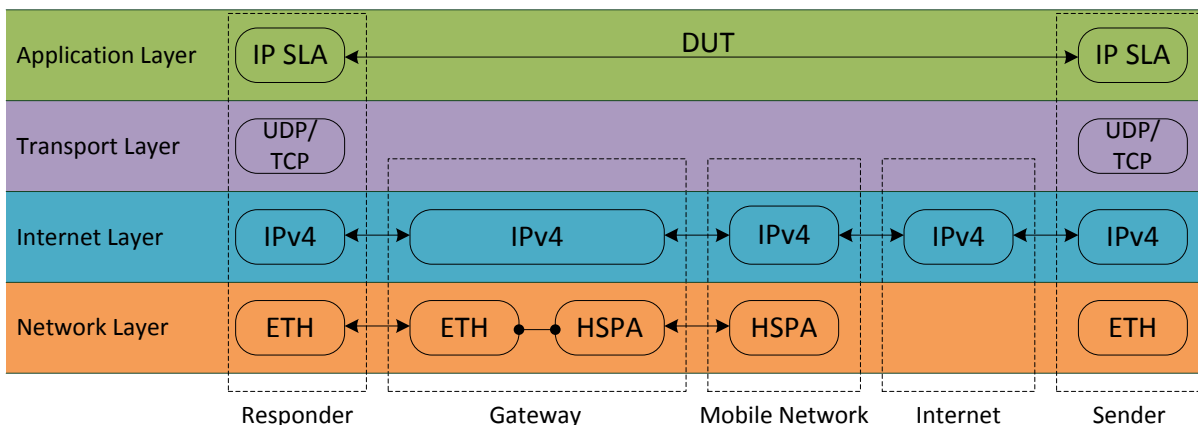


Abbildung 81: Datenpfad der Labortestumgebung aus Protokollsicht

Zur Anwendung in diesem Projekt ist die Labortestumgebung unter anderem bei der Analyse von Anwendungsprotokollen (siehe Kapitel 6.1.3) gekommen.

8 Projektergebnisse nach Arbeitspaketen und Verwendung der Mittel

AP1: Anforderungsanalyse

Ergebnisse	Der Stand der Technik in Hinblick auf die Datenübertragung über Weitverkehrsnetze wurde analysiert (Kapitel 3). Ein Schwerpunkt lag dabei auf den verschiedenen Mobilfunkstandards. Weiterhin wurden die wesentlichen Kenngrößen ermittelt, welche für die Beurteilung der Dienstgüte von M2M-Kommunikation genutzt werden können. Darauf aufbauend wurde die Spezifikation für das Mess- und Auswertesystem erstellt (Abschnitte 4.1 und 4.2).
Personaleinsatz	HPA A (Forschungsstelle 1): 3 PM HPA A (Forschungsstelle 2): 3 PM HPA A (Gesamt): 6 PM HPA F (Forschungsstelle 1): 0 PM HPA F (Forschungsstelle 2): 0,5 PM HPA F (Gesamt): 0,5 PM
Erfüllungsgrad	100 %

AP2: Implementierung des Mess- und Auswertesystems

Ergebnisse	Es wurden drei Konzepte für das Mess- und Auswertesystem implementiert und validiert (Kapitel 4). Konzept 1 umfasst stationäre Langzeitmessungen mittels des Data Quality Analyzer MD1230B von Anritsu. Konzept 2 beschreibt den mobilen Labormessplatz, welcher auf CISCO Routern und deren integrierten SLA-Messmethoden beruht. In Konzept 3 wurde weiterhin eine Embedded-Plattform basierend auf dem Raspberry Pi entwickelt. Letztgenanntes Messsystem zeichnet sich durch seine Mobilität aus, da es keine externen Komponenten wie PCs benötigt.
Personaleinsatz	HPA A (Forschungsstelle 1): 2 PM HPA A (Forschungsstelle 2): 4 PM HPA A (Gesamt): 6 PM HPA F (Forschungsstelle 1): 0 PM HPA F (Forschungsstelle 2): 2,5 PM HPA F (Gesamt): 2,5 PM
Erfüllungsgrad	110 %

AP3: Leistungsuntersuchungen von M2M-Netzen

Ergebnisse	Es wurden mittels der Messsysteme aus AP2 umfangreiche Untersuchungen der
------------	---

	<p>Leistungsfähigkeit der GSM/UMTS/LTE-Zugangstechnologien durchgeführt (Kapitel 5). Es konnte gezeigt werden, dass der Sendezeitabstand einen wesentlichen Einfluss auf das Zeit- und Fehlerverhalten der Mobilfunkstrecke ausübt. Die fehlende Synchronisierung zwischen Applikation und Übertragungssystem wurde als ein Hauptgrund für die schwankenden Übertragungszeiten identifiziert.</p> <p>Es hat sich gezeigt, dass das Szenario wired/wireless das Hauptanwendungsgebiet für M2M-Anwendungen darstellt. Das Szenario wired/wired aus Zeitgründen nicht berücksichtigt. Das Szenario wireless/wireless wurde berücksichtigt, brachte aber keinen Erkenntnisgewinn, da für die Kommunikation zwischen zwei drahtlosen Geräten immer ein drahtgebundenes Gerät für die Adressierung der drahtlosen Geräte benötigt wurde.</p>
Personaleinsatz	<p>HPA A (Forschungsstelle 1): 0,5 PM HPA A (Forschungsstelle 2): 8,5 PM HPA A (Gesamt): 9,0 PM</p> <p>HPA F (Forschungsstelle 1): 3 PM HPA F (Forschungsstelle 2): 4 PM HPA F (Gesamt): 7 PM</p>
Erfüllungsgrad	90 %

AP4: Analyse und Optimierung der Applikationsprotokolle

Ergebnisse	<p>Es wurde das Verhalten der M2M-Applikationsprotokolle OPC UA, CoAP und MQTT untersucht (Kapitel 6). Dazu wurde die in AP5 entwickelte Labortestumgebung eingesetzt. Es hat sich gezeigt, dass sich die Eigenschaften von Mobilfunknetzen insbesondere bei TCP-basierenden Applikationsprotokollen als nachteilhaft erweisen. Es wurden Vorschläge für die Verbesserung des Protokollverhaltens gemacht. Allerdings konnten die Vorschläge nicht mehr in die Praxis umgesetzt und validiert werden.</p>
Personaleinsatz	<p>HPA A (Forschungsstelle 1): 8,5 PM HPA A (Forschungsstelle 2): 3 PM HPA A (Gesamt): 11,5 PM</p> <p>HPA F (Forschungsstelle 1): 0 PM HPA F (Forschungsstelle 2): 0 PM HPA F (Gesamt): 0 PM</p>
Erfüllungsgrad	90 %

AP5: Labortestumgebung für M2M-Komponenten

Ergebnisse	Es wurde eine Labortestumgebung geschaffen, welche die Untersuchung von M2M-Komponenten und Protokollen unter nachstellbaren Bedingungen erlaubt (Kapitel 7). Kernkomponente der Testumgebung ist der MD8475-Mobilfunkemulator der Firma Anritsu.
Personaleinsatz	HPA A (Forschungsstelle 1): 4 PM HPA A (Forschungsstelle 2): 0 PM HPA A (Gesamt): 4 PM HPA F (Forschungsstelle 1): 6,43 PM HPA F (Forschungsstelle 2): 0 PM HPA F (Gesamt): 6,43 PM
Erfüllungsgrad	100 %

AP6: Aufbau einer permanenten Messeinrichtung für M2M-Netze

Ergebnisse	Basierend auf der in AP2 entwickelten Embedded-Plattform wurde eine permanente Messeinrichtung für M2M-Netze aufgebaut (Abschnitt 4.6). Die Raspberry Pi-Plattform kann dabei als Messbake an verteilten Standorten eingesetzt werden. Die Messwerte werden über ein VPN an eine zentrale Datenbank übermittelt und dort visualisiert. Die Synchronisation aller Messkomponenten erfolgt über GPS.
Personaleinsatz	HPA A (Forschungsstelle 1): 1,083 PM HPA A (Forschungsstelle 2): 3,5 PM HPA A (Gesamt): 4,583 PM HPA F (Forschungsstelle 1): 0 PM HPA F (Forschungsstelle 2): 0,9 PM HPA F (Gesamt): 0,9 PM
Erfüllungsgrad	100 %

AP7: Dokumentation der Ergebnisse

Ergebnisse	Die Projektergebnisse wurden in dem vorliegenden Abschlussbericht dokumentiert.
Personaleinsatz	HPA A (Forschungsstelle 1): 2 PM HPA A (Forschungsstelle 2): 2 PM HPA A (Gesamt): 4 PM HPA F (Forschungsstelle 1): 0 PM HPA F (Forschungsstelle 2): 0 PM HPA F (Gesamt): 0 PM
Erfüllungsgrad	100 %

Insgesamt wurden für Durchführung des Projektes die folgenden Personalaufwände benötigt:

	HPA A	HPA F
Forschungs- stelle 1 (inIT)	21,083 PM	9,43 PM
Forschungs- stelle 2 (ifak)	24,0 PM	7,9 PM
Gesamt	45,083 PM	17,33 PM

Die durchgeführten Arbeiten entsprachen im Wesentlichen den vorgesehenen Arbeitsschritten aus dem Projektantrag und können daher als erforderlich und angemessen angesehen werden.

An Geräten wurden für die Projektdurchführung beschafft:

- UMTS (3G) Erweiterung zum vorhandenen Mobilfunk- und Weitverkehrsemulator (FST 1) 39.448,50 €

Der vorhandene Mobilfunkemulator hat vor Projektstart nur den 2G-Mobilfunkstandard GSM unterstützt. Durch die angeschaffte Erweiterung konnte der Emulator und damit die gesamte Labortestumgebung auch für die Untersuchung von Mobilfunknetzen der dritten (UMTS) und vierten (LTE) Generation eingesetzt werden. Das Hauptanwendungsgebiet dieser Beschaffung waren die Arbeitspakete 4 und 5.

- Mobiler Labormessplatz zur Leistungsuntersuchung an M2M-Verbindungen (IPv4/v6) incl. Messmodul für Langzeitmessungen mit dem Anritsu-Analyser (FST 2) 24.643,00 €

Der mobile Labormessplatz zur Leistungsuntersuchung an M2M-Verbindungen stellt im Projekt die messtechnische Grundlage der Untersuchung von Internetzugangstechnologien im M2M-Umfeld dar. Die Gerätebeschaffung dient damit dem Erwerb der notwendigen Hardware für den mobilen Messplatz, das sind je: ein Industrierouter und Industrieswitch sowie ein Netbook für Auswertung und Konfiguration. Die notwendigen Anritsu-Analyser zur Generierung und Messung von Datenströmen sind vorhanden und werden verwendet. Bei der Langzeitmessung kommt es insbesondere auf die zuverlässige Erfassung und Speicherung von Datensätzen aus den Messkampagnen an. Dazu wurde der vorhandene Anritsu-Analyser um ein Ethernet-Messmodul mit entsprechenden Speicherkapazitäten erweitert werden. Das Mess- und Auswertesystem wurde im AP 2 - Implementierung des Mess- und Auswertesystems - implementiert.

9 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

9.1 Wirtschaftsbereiche

Die Projektergebnisse sind vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) aus dem Bereich der Entwicklung und Fertigung von Automatisierungskomponenten, -geräten und -lösungen (Mess-, Regel- und Automatisierungs- sowie Informations- und Kommunikationstechnik) mit M2M-Schnittstelle von Interesse. Eine Relevanz der Ergebnisse besteht auch für KMUs, die als Planungsbüros, Systemintegratoren, Betreiber und Wartungsunternehmer für die Prozess- und Fertigungsindustrie am Markt auftreten. Es ist also eine erhebliche Anzahl von KMU von den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens betroffen. Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes wird erläutert, welche wirtschaftliche Bedeutung für KMU von diesem Vorhaben ausgeht.

9.2 Nutzen der angestrebten Forschungsergebnisse

Mit Hilfe des entwickelten und implementierten Mess- und Auswertesystems für die Performancebewertung von Netzzugangstechnologien können Anwendern von industriellen M2M-Systemen die Übertragungseigenschaften der eingesetzten Netzzugangstechnologie ermitteln. Somit werden diese in die Lage versetzt, die Kommunikationsanforderungen der automatisierungstechnischen Anwendung auf die Übertragungseigenschaften der Netzzugangstechnologie abzustimmen. Die Netzzugangstechnologien können überprüft werden und die statischen Parameter sowie die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Zeitkenngößen können für die Simulation und Planung verwendet werden. Zudem können Bestandteile des Konzeptes der Embedded Plattform für die Integration in herkömmliche M2M-Geräte verwendet werden. Dafür müssen die erstellten Softwarebausteine auf die Zielplattform (M2M-Gerät) portiert und die Hardwarevoraussetzungen am M2M-Gerät geschaffen werden.

Zudem wurde eine Labormessumgebung für die Emulation von Mobilfunknetzen geschaffen, welche das Testen von M2M-Anwendungen unter fest definierten Randbedingungen erlaubt. So ist es möglich, Applikations- und Gerätetests unabhängig von der Beeinflussung von realen Mobilfunknetzen durchzuführen. Ein Anwendungsfall für die Labortestumgebung war die Untersuchung des Verhaltens von M2M-Applikationsprotokollen im Mobilfunk. Hier hat sich gezeigt, dass TCP-basierte Protokolle für bestimmte Anwendungsszenarien ein sehr nachteiliges Übertragungsverhalten bei einer Mobilfunk-basierten Übertragungsstrecke zeigen.

9.3 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU

In diesem Vorhaben wurden erstmals Netzzugangstechnologien für M2M-Anwendungen aus Sicht der Automatisierungstechnik betrachtet und analysiert. Es leistet damit einen weiteren Beitrag, dass sich die M2M-Kommunikation in der industriellen Automatisierung weiter etabliert und somit für Anwendungen der Fernsteuerung, Fernüberwachung und Fernüberdiagnose eingesetzt werden. Neben den Herstellern von Automatisierungsgeräten partizipieren auch Hersteller von typischen Netzzugangskomponenten (vielfach KMU) von diesem Projekt, da sie durch die Nutzung der Ergebnisse den für sie neuen Markt der Automation erschließen können. Hersteller von Automatisierungsgeräten und von speziellen M2M-Geräten – ebenfalls vielfach KMU – verbessern die Akzeptanz ihrer Lösungen. KMUs werden mit den Ergebnissen dieses Projektes in die Lage versetzt, Systeme für die M2M-Kommunikation mit reduziertem Aufwand in Betrieb zu nehmen und können somit neue Anwendungen durch M2M-Technologie erschließen. Somit kann die schnelle Amortisierung einer Systemlösung beim Anlagenbetreiber ermöglicht werden.

10 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

10.1 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Ein zentrales Ziel des Forschungsvorhabens war es, die wissenschaftlich fundierten Resultate anwenderbezogen aufzubereiten. Für einen reibungslosen und stetigen Informationsfluss bedurfte es verschiedener Maßnahmen bereits während sowie nach der Projektlaufzeit.

Der projektbegleitende Ausschuss war am gesamten Verlauf des Projektes m2m@work beteiligt. In regelmäßigen Sitzungen des begleitenden Arbeitskreises und über Newsletter wurden die erzielten Ergebnisse zur Diskussion gestellt. Damit wurde von vornherein eine enge und zielgerichtete Zusammenarbeit von den Forschungsstellen und der Industrie erreicht. Die durch das Forschungsvorhaben gewonnenen Ergebnisse wurden direkt den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt.

Die Veröffentlichungen von Ergebnissen auf einschlägigen Konferenzen waren, ebenso wie die öffentliche Präsentation der Zwischen- und Endergebnisse, obligatorisch. Auf internationalen wissenschaftlichen Kongressen wie der ICIN (International Conference on Industrial Informatics), CESCIT (IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control), INDIN (IEEE International Conference on Industrial Informatics), WFCS (IEEE International Workshop on Factory Communication Systems), ETFA (IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation) und Wireless Congress wurden die Ergebnisse in der internationalen Fachöffentlichkeit diskutiert. Zudem erfolgte die Präsentation und Diskussion der Forschungsergebnisse auf nationalen Kongressen wie dem VDI Automationskongress, der VDI Fachtagung Wireless Automation und der ITG Fachtagung Mobilfunkkommunikation. Besonders hervorzuheben sind die Präsentationen der Forschungsergebnisse auf dem seit 2010 vom inIT und ifak gemeinsam ausgeführten Jahreskolloquium „Kommunikation in der Automation (KommA)“.

Durch die Publikationen in entsprechenden Fachkreisen wie der Forschungsgemeinschaft Automation und bei VDI Kolloquium werden die in dem Vorhaben erzielten Ergebnisse jeweils zeitnah für eine wirtschaftliche Verwertung zur Verfügung stehen.

Im Rahmen der Lehrveranstaltungen Weitverkehrsnetze (Bachelor-Studiengang) und Communication in Distributed Systems (Master-Studiengang Information Technology) sowie entsprechenden Abschlussarbeiten an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe in Lemgo wurden einzelne Themenfelder, welche in diesem Vorhaben bearbeitet wurden, vertieft. Studierenden wurden so im Rahmen des Vorhabens umfangreiche Möglichkeiten zu einer intensiven praxisnahen Beschäftigung mit Fragestellungen aus dem Bereich der M2M-Kommunikation geboten.

Die geplanten Ergebnistransfers in die Wirtschaft zur „M2M-Alliance e.V.“ erfolgten nicht, da sich die „M2M-Alliance e.V.“ nicht am projektbegleitenden Ausschuss beteiligte. Eine Diskussion der Forschungsergebnisse erfolgt in einer engen Zusammenarbeit mit der Firma SSV Software Systems GmbH als Mitglied der M2M-Alliance e.V.

Die realisierten Transferkonzepte in die Wirtschaft sind in Abschnitt 10.2 und die geplanten Transferkonzepte in die Wirtschaft sind in Abschnitt 10.3 dargestellt. Von den geplanten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft konnten lediglich die Nutzung der Plattform der „M2M-Alliance“ und die Veröffentlichung in industrienahen Fachzeitschriften nicht realisiert werden. Allerdings wurden die nicht realisierten Maßnahmen durch eine Vielzahl an Veröffentlichungen auf nationalen und internationalen Kongressen kompensiert. Zudem wurde der Kontakt zur M2M-Alliance über Mitgliedsfirmen hergestellt.

10.2 Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Die spezifischen Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Projekt m2m@work sind in Tabelle 31 aufgelistet.

Tabelle 31: Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum
Maßnahme A: Weiterbildung/Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über Fachveranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazitäten, mit Referenten der Forschungsstellen	A1: Forschungsgemeinschaft Automation A2: VDI Kolloquium A3: VDI Automation Kongress A4 + A5: Komma A6: ITG Fachtagung A7: VDI Wireless Automation A2: VDI Kolloquium	Juni 2014 Juni 2014 Juli 2014 Nov. 2014 Mai 2015 Juni 2015 Juli 2015
Maßnahme B: Newsletter	Eine rasche und umfassende Verbreitung wird durch den elektronischen Newsletter sichergestellt	B1: Ausgewählte Ergebnisse werden in Form eines Newsletter an den projektbegleitenden Ausschuss geschickt	03/2014 04/2014 05/2014 06/2014 07/2014 10/2014
Maßnahme C: Projektbegleitender Ausschuss PA	Die Forschungsergebnisse sollen fortlaufend im PA ausführlich diskutiert werden.	C1: Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten C2 Vorstellung der ersten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	2. Quartal 2013 4. Quartal 2013 4. Quartal 2014
Maßnahme D: Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge	Die Forschungsergebnisse sollen auf internationalen Konferenzen vorgestellt und mit einem breiten wissenschaftlichen Publikum diskutiert werden.	D1: 18th ICIN 2015 D2: 11th WFCS 2015 D3: 2nd CESCIT 2015 D4: 13th INDIN 2015	Febr. 2015 Mai 2015 Juni 2015 Juli 2015

Die detaillierten Quellenangaben zu den Maßnahmen A und D sind in Tabelle 32 aufgelistet.

Tabelle 32: Quellenangaben zu Veröffentlichungen während der Laufzeit des Vorhabens

Rahmen	Maßnahme	Termin
A1	Kraetzig, Marko: M2M@Work - Leistungsfähigkeit von Internetzugangstechnologien für zuverlässige M2M-Anwendungen in der Automation. Statusbericht, 15. Sitzung der Forschungsgemeinschaft Automation	Juni 2014
A2	Kraetzig, Marko: Bewertung von drahtlosen Netzzugangstechnologien für zuverlässige M2M-Anwendungen. VDI Kolloquium, Magdeburg, Deutschland, Jun 2014	Juni 2014
A3	Kraetzig, Marko; Dürkop, Lars; Czybik, Björn: Methodik zur Bewertung von drahtlosen Netzzugangstechnologien für zuverlässige M2M-Anwendungen. In: Automation 2014, Baden-Baden, Deutschland, Jul 2014	Juli 2014
A4	Ott, Hans-Peter; Joest, Stephan; Dürkop, Lars; Jasperneite, Jürgen: Communication design considerations for M2M applications. In: Komma 2014 – Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, Lemgo, Germany, Nov 2014	Nov. 2014
A5	Walter, Klaus-Dieter; Czybik, Björn: Leistungsbewertung von Mobilfunktechnologien für Echtzeit-M2M-Kommunikation am Beispiel von	Nov.

Rahmen	Maßnahme	Termin
	virtuellen Kraftwerken. In: KommA 2014 – Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, Lemgo, Nov 2014	2014
A6	Krätzig, M.; Rauchhaupt, L.; Dürkop, L.: Bewertung von Internetzugangstechnologien für zuverlässige M2M-Anwendungen in der Automation. 20. ITG-Fachtagung Mobilkommunikation, Hochschule Osnabrück, 7.-8.05.2015, Kooperationsveranstaltung der ITG, der Hochschule Osnabrück und des VDE Bezirksvereins Osnabrück Emsland e.V., 2015	Mai 2015
A7	Krätzig, M.: Leistungsuntersuchung mobiler Netzzugangstechnologien. VDI-Fachtagung WIRELESS AUTOMATION, 11.-12.06.2015, Baden-Baden, VDI Wissensforum GmbH, 2015	Juni 2015
A8	Kraetzig, Marko: "Automation über das Handy-Netz? - Mobilfunk-Performance für Automatisierungsanwendungen". VDI Kolloquium, Magdeburg, Deutschland, Juli 2015	Juli 2015
D1	Dürkop, Lars; Czybik, Björn; Jasperneite, Jürgen: Performance Evaluation of M2M Protocols Over Cellular Networks in a Lab Environment. In: 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks (ICIN), Paris, Feb 2015	Febr. 2015
D2	Elattar, Mohammad; Jasperneite, Jürgen: Using LTE as an Access Network for Internet-Based Cyber-Physical Systems. In: 11th IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS 2015) Palma de Mallorca, Mai 2015	Mai 2015
D3	Kraetzig, Marko; Rauchhaupt, Lutz: Performance Assessment of Mobil Network Technologies for Industrial M2M Application. 2nd Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control, June 22-24, 2015, Maribor, Slowenien	Juni 2015
D4	Elattar, Mohammad; Dürkop, Lars; Jasperneite, Jürgen: Utilizing LTE QoS Features to Provide Reliable Access Network for Cyber-Physical Systems. In: 13th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2015), Cambridge, Vereinigtes Königreich, Jul 2015	Juli 2015

10.3 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens:

Die spezifischen Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens m2m@work sind in Tabelle 33 aufgelistet.

Tabelle 33: Spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum
Maßnahme E: Veröffentlichungen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	E1: Bericht auf den Websites der Forschungsstellen E2: Jahresbericht der Forschungsstellen	4. Quartal 2015 1. Quartal 2016

Maßnahme F: Transfer in die Industrie durch Verband	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	F1: Zusammenfassende Darstellung im Forschungsreport und Verbreitung durch die Forschungsvereinigung in Industrie	November 2015
Maßnahme G: Beratung der Industrie basierend auf erzielten Forschungsergebnissen	Maßgeschneiderter Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis	G1: Bei Bedarf weiterer Transfer der Ergebnisse in die betriebliche Praxis	Laufend
Maßnahme H: Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge	Die Forschungsergebnisse sollen auf internationalen Konferenzen vorgestellt und mit einem breiten wissenschaftlichen Publikum diskutiert werden.	H1: ETFA 2015 H2: Wireless Congress	Sept. 2015 Nov. 2015

Die detaillierten Quellenangaben zu den Maßnahmen H sind in Tabelle 34 aufgelistet.

Tabelle 34: Quellenangaben zu Veröffentlichungen nach Abschluss des Vorhabens

Rahmen	Maßnahme	Termin
H1	Henneke, Dominik; Elattar, Mohammad; Jasperneite, Jürgen: Communication Patterns for Cyber-Physical Systems. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2015), Luxemburg, Sep 2015	Sep. 2015
H2	Kraetzig, Marko: Evaluation of Mobil Network Access Technologies for Machine to Machine Application. Wireless Congress 2015: Systems & Applications, 17.-18. November 2015, Munich, Germany	Nov. 2015

11 Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgruppe 2 des Nationalen IT-Gipfels: Digitale Infrastrukturen, Jahrbuch 2011/2012. Kapitel 2.3 Kompetenznetzwerk Machine-to-Machine-Kommunikation (Seite 163-191).
- [2] Kiefer, F.: "GEZE WebCare - eine M2M Anwendung für den Service von Bauprodukten". M2M Kompetenztag, 2010
- [3] Süsse, A.: "Mit CarLA unterwegs – ein Multitool in der Telematik". M2M Kompetenztag, 2010
- [4] Denzin, F.: "M2M im GSM-Netz: Anforderungen an Mobilfunkterminals". M2M Kompetenztag, 2010
- [5] "Smart Metering - Revolution der Messtechnik in der Energiebranche?", http://winfwiki.wifom.de/index.php/Smart_Metering_Revolution_der_Messtechnik_in_der_Energiebranche%3F
- [6] Geisberger, E. ;Broy, M.: acatech Studie, Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Springer Vieweg Verlag; 2012.
- [7] Manfred Taferner, Ernst Bonek. „Wireless Internet Access over GSM and UMTS“, Springer, 2002.
- [8] HSDPA – High Speed Downlink Packet Access, <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0910251.htm>.
- [9] Mark Schäfermann, „M2M Abschlussbericht“, inIT-internes Dokument, 2010.
- [10] Mark Schäfermann, „SCAT Zwischenbericht“, inIT-internes Dokument, 2010.
- [11] Mark Schäfermann, „SCAT Messbericht“, inIT-internes Dokument, 2010.
- [12] <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1207011.htm>
- [13] <http://files.vogel.de/vogelonline/vogelonline/companyfiles/5135.pdf>
- [14] <http://www.idgeurope.se/images/stories/pdf/Iridium%20IDG%20Aviation%20Seminar%20Stockholm%20JWhite%20030912%20LDeCastro%20Edits%20030712.pdf>
- [15] RFC2678: IPPM Metrics for Measuring Connectivity
- [16] RFC2679: One-way delay metric for IPPM
- [17] VDI/VDE 2185 Blatt 1 Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik
- [18] RFC2680: One Way Packet Loss Metric for IPPM
- [19] RFC2681: Round-trip for Delay Metric for IPPM
- [20] Siemens AG, Drahtlose Datenkommunikation über GPRS mit S7-1200 und CP 1242-7. Applikationsbeschreibung, November 2011, Beitrags-ID: 39863979, http://cache.automation.siemens.com/dnl/TM/TM4MTEzAAAA_39863979_Tools/39863979_CE-X21_Scenario1_CP1242-7_DOKU_V11_d.pdf.
- [21] Siemens AG, S7-1200 - Telecontrol CP 1242-7 Betriebsanleitung,03/2012, http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/196948-an-01-de-SIEMENS_GPRS_MODUL_FUER_S7_1200.pdf
- [22] ISDN Grundlagen. Salinas IT Service GmbH
- [23] Göller, J.: Der ISDN-D-Kanal. Lehrbrief, Humboldt-Universität zu Berlin, 2000
- [24] Göller, J.: Der ISDN-D-Kanal im Dialog. 2. überarbeitete Auflage, 1999, Duderstadt, EPV-Verlag, inkl. CD mit Tracetool ISDNView, ISBN 3-924544-80-8
- [25] Poel, ISDN D-Kanalprotokoll – Kurzfassung. 2007

- [26] Kaderali, Firoz; Kommunikationsnetze und –protokolle. Hagen, 2005
- [27] <http://www.ifac.ch/46669.html>
- [28] http://de.wikipedia.org/wiki/Digital_Subscriber_Line
- [29] Powerline-Datenübertragung fürs Smart Grid.
<http://www.heise.de/netze/meldung/Powerline-Datenuebertragung-fuers-Smart-Grid-1932489.html>
- [30] ETSI TS 103 908 V1.1.1; PowerLine Telecommunications (PLT); BPSK Narrow Band Power Line Channel for Smart Metering Applications. Technical Spezifikation, 10/2011
- [31] Denzin, F.: “M2M im GSM-Netz: Anforderungen an Mobilfunkterminals“. M2M Kompetenztag, 2010
- [32] Barelmann, D.: “GPRS in der Fernwirk- und Automatisierungstechnik“. etz, Heft 1/2007
- [33] IEC 60870-5, “Communication Profile Telecontrol Equipment and Systems”. Technical Committee 57, International Electrotechnical Commission, 1997
- [34] IEC 60870-5-104, “Network access for IEC 60870-5-101 using standard transport profiles”. International Electrotechnical Commission, 2000
- [35] IEC 61850 Communication Networks and Systems in Substations, Technical Committee 57, International Electrotechnical Commission, 2004
- [36] Stuckmann, P.; Franke, J.: “Performance characteristics of the Enhanced General Packet Radio Service for the mobile Internet access”. 2nd International Conference on 3G Mobile Communication Technologies, 2001
- [37] VDI-Gesellschaft Systementwicklung und Projektgestaltung, Arbeitsgruppe Terminologie: VDI 4001 Terminologie der Zuverlässigkeit, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2006
- [38] Cisco Systems: “User Guide: Cisco IOS IP Service Level Agreements“
- [39] Cisco Systems: “IOS IP SLAs UDP Jitter Operation Technical Analysis“
- [40] <http://www.idgeurope.se/images/stories/pdf/Iridium%20IDG%20Aviation%20Seminar%20Stockholm%20JWhite%20030912%20LDeCastro%20Edits%20030712.pdf>
- [41] B. Evans, Satellite Communication Systems, 3rd Edition, IET, 1999.
- [42] M. B. Hans Dodel, Satellitensysteme für Kommunikation, Fernsehen und Rundfunk: Theorie und Technologie, Hüthig, 1990.
- [43] M. MITRA, SATELLITE COMMUNICATION, PHI Learning Pvt. Ltd, 2005.
- [44] G. Giambene, Resource Management in Satellite Networks: Optimization and Cross-Layer Design, Springer, 2007
- [45] MD1230B, MD1230B Data Quality Analyser – Product Brochure. Anritsu, 2013, Catalog No. MD1230B-E-A-1-(9.0)
- [46] MU120111A, MU120111A 10/100M Ethernet Module for MD1230A Data Quality Analyser. Anritsu, 2003, Catalog No. MU 120111A/120112A-E- A-3 -(1.0)
- [47] RFC2460: Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification
- [48] RFC 1883, Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. 1995
- [49] RFC1700, ASSIGNED NUMBERS
- [50] RFC3065: Autonomous System Confederations for BGP
- [51] RFC5569: IPv6 Rapid Deployment on IPv4 Infrastructures (6rd)
- [52] RFC4380: Tunneling IPv6 over UDP through Network Address Translations (NATs)

- [53] RFC2765: Stateless IP/ICMP Translation Algorithm (SIIT)
- [54] RFC5214: Intra-Site Automatic Tunnel Addressing Protocol (ISATAP)