

BACHELORARBEIT

Entwicklung und Evaluierung eines Systems zur Fernsteuerung von Art-Net- und DMX- Endgeräten über das Mobilfunknetz

vorgelegt am 30. April 2026

Oliver Wolfertz

Erstprüfer: Prof. Dr. Jan Mietzner
Zweitprüfer: Thorsten Wagener

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**
Department Medientechnik
Finkenau 35
20081 Hamburg

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein skalierbares System zur Übertragung von Art-Net-Steuerdaten über das Mobilfunknetz entwickelt und evaluiert. Das System besteht aus einer Sendeinstanz, einer Vermittlungsinstanz und einem Empfänger, der als Hardware-Prototyp aufgebaut wird. Zunächst werden bestehende Funklösungen am Markt auf ihre Grenzen untersucht und preislich eingeordnet. Anhand von möglichen Einsatzszenarien wird anschließend aufgezeigt, wie Mobilfunk in diesem Kontext einen Mehrwert bietet. Dann werden die funktionalen und qualitativen Anforderungen an das System definiert. Es folgt eine Analyse der Lichtsteuerprotokolle DMX512 und Art-Net für die Implementierung im Prototyp. Für den Systementwurf werden die nötigen netzwerktechnischen Grundlagen erläutert und die Mobilfunkgenerationen GSM/EDGE, LTE und 5G hinsichtlich ihrer Quality-of-Service-Methodiken, Verfügbarkeit und Datenraten analysiert. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird das System implementiert. Die abschließende Evaluierung zeigt, dass das System die funktionalen Anforderungen erfüllt, jedoch den qualitativen Anforderungen nur in Situationen mit geringer Publikumsdichte gerecht wird.

Abstract

This thesis develops and evaluates a scalable system for the transmission of the Art-Net protocol via cellular networks. The architecture comprises a transmitter, a relay server, and a receiver built as a hardware prototype. Initially, existing commercial wireless solutions are evaluated to identify their limitations and are classified by price. By exploring potential deployment scenarios, the study highlights the added value of cellular networks in this domain. Following the definition of functional and qualitative system requirements, the DMX512 and Art-Net lighting control protocols are analyzed for their integration into the prototype. The system design outlines fundamental networking concepts and analyzes GSM/EDGE, LTE and 5G cellular generations regarding their Quality-of-Service methodologies, availability, and data rates. The system is then implemented based on these theoretical foundations. The final evaluation reveals that while the system successfully meets all functional requirements, it only satisfies the qualitative demands in environments with low crowd density.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	6
1.1 Motivation.....	6
1.2 Aufbau der Arbeit	6
2. Marktanalyse und Anforderungen	7
2.1 Die Grenzen bestehender Drahtlos-Systeme	7
2.2 Einsatzszenarien	9
2.3 Anforderungen an das System	11
2.3.1 Funktionale Anforderungen.....	11
2.3.2 Qualitative Anforderungen	12
3. Technische Grundlagen.....	14
3.1 Lichtsteuerung	14
3.1.1 DMX512.....	14
3.1.2 Art-Net	17
3.1.3 Ein typisches Lichtsystem mit Art-Net und DMX512	19
3.2 Netzwerk	21
3.2.1 Das TCP/IP-Referenzmodell	21
3.2.2 Physikalische Verbindungen und Netzzugang	22
3.2.3 IPv4 und Network Address Translation NAT.....	23
3.2.4 TCP, UDP und Sockets	26
3.2.5 Latenz, Ping und Jitter	28
3.3 Mobilfunk.....	29
3.3.1 Quality of Service (QoS)	29
3.3.2 GSM und EDGE	31
3.3.3 Long Term Evolution LTE	34
3.3.4 5G New Radio (NR).....	37
3.4 Serielle Schnittstellen und Kommunikation	44
3.4.1 Serial Peripheral Interface (SPI)	44
3.4.2 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART).....	45
3.4.3 Hayes-AT-Befehlssatz	46
4. Systementwurf	47
4.1 Grundlegende Architektur	47

4.2 Kommunikationsstrategie	48
4.3 Messungen für die Dimensionierung des Systems.....	49
4.4 Auswahl der Komponenten	51
4.4.1 Mikrocontroller	51
4.4.2 Mobilfunkmodul.....	51
4.4.3 Ethernet- und RS485-Schnittstellen.....	51
4.5 Kosten des Hardware-Prototyps	52
5. Implementierung	53
5.1 Empfänger Hardware-Prototyp	53
5.1.1 Aufbau der Hardware.....	53
5.1.2 Software des Empfängers	55
5.2 Relay-Server	61
5.2.1 Server-Eckdaten.....	61
5.2.2 Relay-Server-Software.....	61
5.3 Sender.....	62
6. Evaluierung	63
6.1 DMX-Funktionalität des Empfängers	63
6.1.1 Methodik und Aufbau	63
6.1.2 Ergebnis	64
6.2 Optische Latenzanalyse des Gesamtsystems.....	65
6.2.1 Methodik und Aufbau	65
6.2.2 Durchführung und Messergebnisse	66
6.3 Feldversuch auf dem Hamburger DOM.....	67
6.3.1 Methodik und Aufbau	67
6.3.2 Durchführung und Messergebnisse	68
6.4 Aufstellung der Kosten des Gesamtsystems	72
6.5 Interpretation der Ergebnisse	72
6.6 Kritik der Methodik.....	74
7. Fazit.....	75
8. Ausblick.....	76
8.1 Erweiterungsmöglichkeiten und Skalierbarkeit	76
8.2 Chancen der Implementierung von 5G	76

Abbildungsverzeichnis	78
Literaturverzeichnis	80
Anhang	84
Verwendete Programme und Hilfsmittel	86

1. Einleitung

1.1 Motivation

Bei der Betrachtung von Show-Lichtsystemen auf dezentralen Großveranstaltungen oder Events mit weitläufig verteilten Nebenschauplätzen können kabelgebundene Infrastrukturen oft auf logistische Hürden stoßen. Sollen diese Bereiche als ganzheitliche Lichtinstallation parallel bespielt werden, geht das mit einem hohen Aufwand in der Signalverteilung einher. Besonders physische Barrieren im urbanen Raum, wie beispielsweise Straßen oder Wasserwege, können das Verlegen von Kabelwegen erschweren.

Zur Überwindung dieser Hürden sind bereits Funklösungen am Markt etabliert, welche die Übertragung von Licht-Steuersignalen kabellos umsetzen. Allerdings erfordern diese in der Regel den Aufbau eigener Infrastrukturen und sind, mit steigenden Ansprüchen an die Zuverlässigkeit und Reichweite, mit hohen Anschaffungskosten verbunden.

Das fast flächendeckend verfügbare Mobilfunknetz bietet einen Ansatz, Lichtsteuerdaten anhand des IP-Basierten Art-Net-Protokolls weitläufig zu übertragen. Dabei könnte sich die Möglichkeit einer kompletten Remote-Steuerung ergeben, bei der es nicht mehr erforderlich ist, dass Sender und Empfänger am selben geografischen Ort positioniert sind.

Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit untersucht, indem ein System zur Übertragung von Lichtsteuerdaten über das Mobilfunknetz entwickelt und evaluiert wird. Der Fokus des Systems liegt auf der Strecke zwischen einer Signalquelle, wie ein Lichtstellpult im Front of House (FoH), und dem zu steuernden Lichtsystem. Die Verkabelung innerhalb eines Lichtsystems erfolgt weiterhin über den gängigen DMX512-Standard.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit einer Markanalyse, welche die Grenzen bestehender Drahtlos-Systeme benennt. Danach werden mögliche Einsatzszenarien für das zu entwickelnde System vorgestellt und die Anforderungen an das System definiert. Es folgt eine Erläuterung der für die Entwicklung und Evaluierung relevanten technischen Grundlagen. Dies umfasst thematisch die Lichtsteuerung, die Netzwerktechnik und eine Analyse der aktuellen Mobilfunkstandards. Danach folgen der Systementwurf und die Implementierung. Die Evaluierung stellt eine dreiteilige Versuchsreihe dar, welche die Gesamtlatenz, die DMX512-Funktionalität und den Paketverlust umfasst. Letzteres wird unter realen Bedingungen auf der Großveranstaltung Hamburger Dom am April 2026 gemessen. Das Ende dieser Arbeit bildet das Fazit mit einem Ausblick über zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten des Systems und die Integration des Mobilfunkstandards 5G.

2. Marktanalyse und Anforderungen

Das folgende Kapitel beginnt mit einer Marktanalyse der bestehenden Lösungen für Drahtlos-Verbindungen in der Lichttechnik. Nachdem die Grenzen dieser Lösungen benannt sind, werden mögliche Einsatzszenarien des Systems anhand konkreter Anwendungsbeispiele vorgestellt. Des Weiteren werden die funktionalen und qualitativen Anforderungen an das System definiert.

2.1 Die Grenzen bestehender Drahtlos-Systeme

Um die Notwendigkeit des Systems zu rechtfertigen, ist eine Betrachtung des aktuellen Standes der Technik im Bereich der drahtlosen Lichtsteuerung erforderlich. Anschließend werden die Probleme und Grenzen dieser Ansätze erläutert.

Bestehende Lösungen für die drahtlose Übertragung von Lichtsteuerdaten lassen sich primär in zwei Kategorien unterteilen: proprietäre Wireless-DMX-Systeme und IP-basierte Übertragung via WLAN.

Wireless DMX-Systeme

„Wireless DMX“ dient in der Veranstaltungstechnik als Sammelbegriff für verschiedene Ansätze der Hersteller, das DMX512 Protokoll per Funk zu übertragen. Im Einstiegssegment finden sich Systeme wie Eurolite QuickDMX oder Chauvet DJ D-Fi, die ein DMX-Universum im 2,4-GHz-Band übertragen. Während Chauvet hier eine Reichweite von circa 50 Metern angibt, soll das Produkt von Eurolite bis zu 400 Meter übertragen können, unter der Prämisse einer direkten Sichtverbindung. Für beide Produkte müssen Sender und Empfänger separat erworben werden. So liegen die Preise für eine Funkstrecke bei 97 € für Chauvet und bei 132 € für Eurolite (Stand April 2026) [1] [2], [3], [4] .

Im professionellen Produktionsumfeld hat sich CRMX (Cognitive Radio Multiplexer) des Herstellers LumenRadio als Industriestandard etabliert. Als Weiterentwicklung des geschützten Markenstandards W-DMX soll CRMX eine zuverlässigere Fehlerkorrektur besitzen. Es ermöglicht bei Geräten wie dem Stardust die simultane Übertragung von bis zu acht DMX-Universen über Distanzen von bis zu 700 Metern. Zwar existieren von LumenRadio auch vernetzte Systeme für festinstallierte Architekturbeleuchtung, jedoch finden sich für die Steuerung von Event-Lichtinstallationen bisher keine etablierten Systeme mit integrierter mobiler Internetanbindung. Der Preis für das Produkt Stardust beträgt zum Zeitpunkt dieser Arbeit 2899 € [5], [6].

Wireless Local Area Networks (WLAN)

Da das Art-Net-Protokoll auf dem Internetprotokoll basiert, kann es über WLAN übertragen werden. Auch hier kommen die Bänder 2,4 GHz und 5 GHz zum Einsatz. Die Reichweite dieser Übertragungsmethode ist jedoch durch Regularien limitiert. Nach den Vorgaben der Bundesnetzagentur ist für diese Bänder die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) in Deutschland auf 100 mW (2,4 GHz) und 200 mW (5 GHz) begrenzt. Zwar lässt sich die Reichweite durch den Einsatz von Richtantennen bündeln und so punktuell erhöhen, was jedoch den Aufbau von Sende- und Empfangspositionen voraussetzen würde [7, S. 3].

Problematiken der bestehenden Funklösungen

Nahezu alle bestehenden Systeme teilen sich das stark frequentierte 2,4-GHz-Band. Auf Großveranstaltungen mit hoher Personendichte führen viele Consumer-Geräte mit aktiviertem WLAN und Bluetooth zu einem enormen Anstieg des Signal-Grundrauschens, was die Zuverlässigkeit der Funkstrecken reduziert. Zusätzlich reagiert das Band sehr empfindlich auf Dämpfung durch Hindernisse. Die kurzen Wellenlängen werden durch urbane Bebauung oder auch durch Menschenmengen stark gedämpft [8, S. 218–219]. Eine Signalverteilung in verwinkelten Straßenzügen ist mit konventionellem Wireless-DMX, ohne direkte Sichtverbindung, kaum ausfallsicher zu realisieren.

Sowohl W-DMX als auch WLAN erfordern den Aufbau einer Sender-Infrastruktur vor Ort. Für eine Remote-Produktion müsste stets ein Internet-Gateway eingerichtet werden, welcher das Steuersignal aus dem WAN (Wide Area Network) empfängt und lokal per Funk weiterverteilt. Bei mobilen Lichtinstallationen auf einem LKW würde das bedeuten, Access-Points entlang einer Strecke aufzubauen, was mit einem hohen Aufwand einhergeht.

Die Analyse der bestehenden Drahtlos-Systeme zeigt, dass diese primär für ein lokales Setup, an dem sich Signalquelle und Empfänger am selben Ort befinden, konzipiert sind. Die annähernd flächendeckende Verfügbarkeit der Mobilfunkinfrastruktur bietet das Potenzial für eine vereinfachte Signalverteilung, höhere örtliche Flexibilität und eine größere Unabhängigkeit von eigener Infrastruktur.

2.2 Einsatzszenarien

Aus den Möglichkeiten der Mobilfunkübertragung lassen sich drei grundlegende Szenarien für die Signalverteilung ableiten:

Szenario 1: Lokale Signalverteilung über das Mobilfunknetz

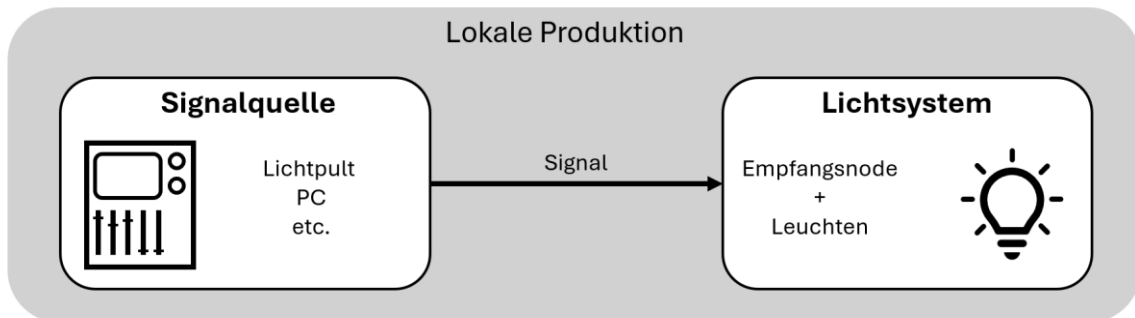


Abbildung 1: Lokales Produktionsszenario

In diesem Szenario befinden sich sowohl die Signalquelle (FOH) als auch das Lichtsetup am selben Veranstaltungsort. Jedoch verhindern die lokalen Gegebenheiten (wie große Distanzen oder Straßen) eine direkte Kabelverbindung. Anstatt auf Richtfunk- oder W-DMX-Strecken zurückzugreifen, wird das Steuersignal über das öffentliche Mobilfunknetz vom Pult zur Bühne übertragen. Dieses Setup zielt auf eine Reduzierung des Aufwands beim Auf- und Abbau ab.

Szenario 2: Remote Produktion

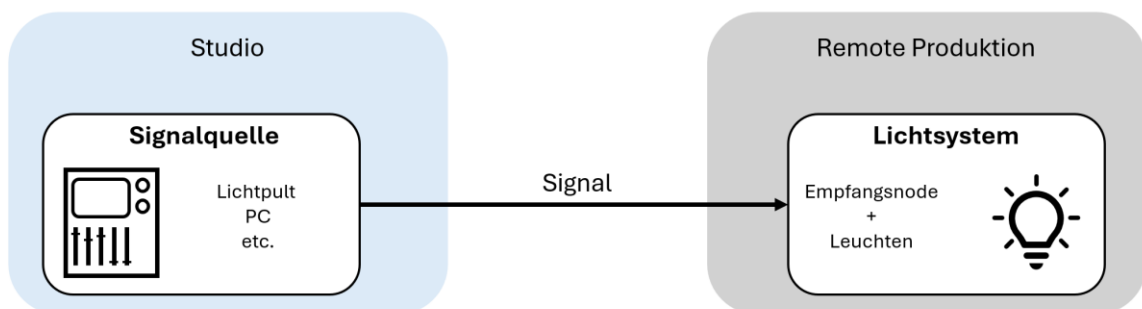


Abbildung 2: Remote Produktionsszenario

Bei einer Remote Produktion sind die Signalquelle und das Lichtsetup räumlich voneinander getrennt. Das steuernde Lichtpult befindet sich in einem stationären Studio, während das Lichtsystem an einem entfernten Produktionsort platziert ist. Die Art-Net-Steuerdaten werden an einen Server gesendet. Das Endgerät empfängt sie via Mobilfunk. Der Operator im Studio kann das Lichtbild in Echtzeit anpassen, ohne vor Ort sein zu müssen. Das abgebildete Szenario bildet den Hauptfokus für die technische Umsetzung und Evaluierung im Rahmen dieser Arbeit.

Szenario 3: Skalierte Remote Produktion

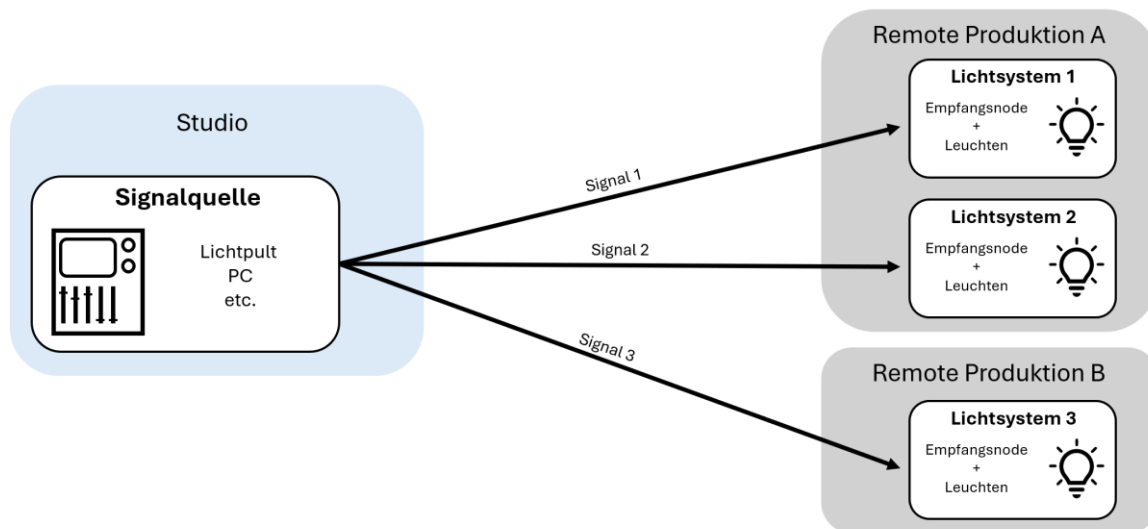


Abbildung 3: Skaliertes Remoteproduktions-Szenario

Aufbauend auf Szenario 2 stellt dieses Konzept eine mögliche Skalierbarkeit des Systems dar. Eine einzige Signalquelle steuert gleichzeitig mehrere voneinander unabhängige Lichtsetups an verschiedenen Orten. Die Idee der dezentralen Großveranstaltung mit vielen Nebenschauplätzen spiegelt dieses Szenario wider. Ein wesentlicher Vorteil hierbei ist, dass beliebig viele Empfänger dem System hinzugefügt werden können, solange sie sich im Abdeckungsbereich des Mobilfunknetzes befinden.

2.3 Anforderungen an das System

Um einen Mehrwert gegenüber bestehenden Drahtlos-Lösungen zu bieten, basiert das in dieser Arbeit zu entwickelnde System auf der Nutzung der flächendeckend verfügbaren Mobilfunkinfrastruktur. Dieser Ansatz zielt primär darauf ab, den logistischen Aufwand während der Auf- und Abbauphasen von temporären Lichtinstallationen zu reduzieren und gleichzeitig eine ortsunabhängige Steuerung zu ermöglichen. Dafür werden im Folgenden funktionale und qualitative Anforderungen an das System gestellt.

2.3.1 Funktionale Anforderungen

Dieser Anforderungsteil definiert die erforderlichen Systemkomponenten und listet die benötigten Kernfunktionalitäten des Systems auf.

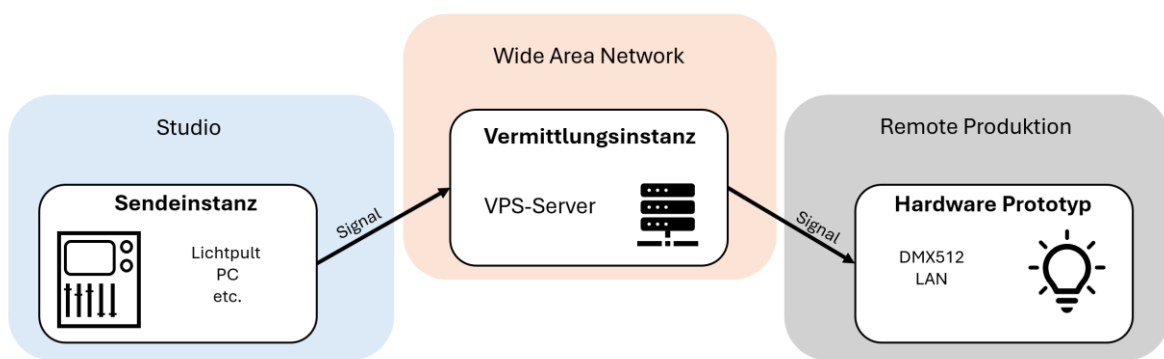


Abbildung 4: Entwurf des Gesamtsystems, bestehend aus Sendeinstanz, Vermittlungsinstanz und Hardware-Prototyp

Eine Sendeinstanz erzeugt Lichtsteuerdaten und schickt sie an einen Vermittlungs-Server. Der Grund für die Erfordernis dieser Vermittlungsinstanz liegt in netzwerktechnischen Einschränkungen, sie werden in den technischen Grundlagen über Netzwerke in Kapitel 3.2.3 erläutert. Er leitet die Steuerdaten weiter zu einem Empfänger, der im Rahmen dieser Arbeit als Hardware-Prototyp aufgebaut wird. Der Empfänger muss das Signal in ein lokales Lichtsystem umsetzen können.

Zusammenfassend werden die folgenden Anforderungen an das System gestellt:

1. Die Sendeinstanz muss Art-Net Pakete an die Vermittlungsinstanz senden.
2. Die Vermittlungsinstanz muss die Art-Net-Pakete weiterleiten.
3. Der Hardware-Prototyp muss sich selbstständig in das Mobilfunknetz einwählen.
4. Der Hardware-Prototyp muss ein über Mobilfunk eingehendes Art-Net-Universum als DMX512 Signal ausgeben.
5. Der Hardware-Prototyp muss mindestens ein über Mobilfunk eingehendes Art-Net-Universum in ein lokales Netzwerk übertragen.

2.3.2 Qualitative Anforderungen

Signalverzögerung (Latenz)

Da der Signalweg über das Mobilfunknetz und Internet wesentlich komplexer ist als eine lokale Verbindung, ist mit höheren Latenzzeiten zu rechnen. Allerdings sollten sichtbare Verzögerungen vermieden werden, vor allem wenn ein Licht- und ein Tonsignal synchron laufen sollen. Eine Studie zur menschlichen Wahrnehmung audiovisueller Synchronität zeigt, dass Probanden auf einen Tonvorlauf (Audio vor Video) sensibel reagieren.

Im Gegensatz dazu wird eine Tonverzögerung (Video vor Audio) von den Probanden im Bereich von 15 ms bis 75 ms als synchron empfunden [9, S. 1]. Die folgende Grafik zeigt die Bewertung der Verzögerung durch die Probanden anhand von Schulnoten, unterteilt in die Medieninhalte Musik, Sprache und Geräusche.

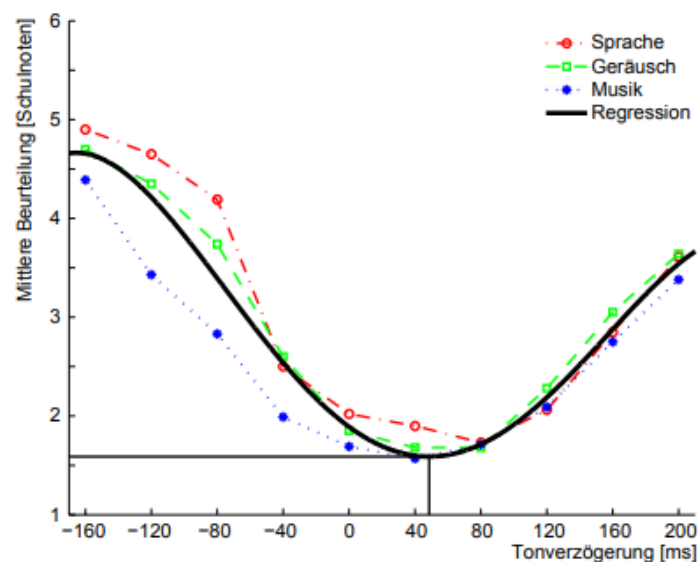


Abbildung 5: Die Bewertung der Ton- zu Videoverzögerung anhand von Schulnoten [9, S. 532]

Dem Graphen (Abbildung 5) lässt sich entnehmen, dass die Probanden im Durchschnitt eine Verzögerung von ca. -60 ms (der Ton tritt 60 ms vor dem Video auf) als „befriedigend“ bewerten. Jedoch variiert die Bewertung nach der Art des Tonsignals. So wird ein Tonvorlauf von Musik weniger kritisch bewertet als von Sprache und Geräuschen.

Daraus lässt sich für das zu entwickelnde System ableiten, dass eine Latenz von 60 ms noch als akzeptabel gilt. Treten höhere Latenzen auf, müsste ein Audiosignal gegebenenfalls gepuffert werden, sodass es möglichst nicht vor dem Lichtsignal abgespielt wird.

Stabilität der Verbindung

Eine dynamische Lichtshow besteht aus Dimmvorgängen, Bewegungen und Farbverläufen. Ähnlich wie bei einem Videostream führen Unterbrechungen im Datenfluss zu sichtbaren Störungen in der Wiedergabe. So können Schwankungen der Paketrate und Paketverluste durch schlechten Empfang das Lichtbild negativ beeinflussen. Der Paketverlust sollte also möglichst gering gehalten werden und Schwankungen in der Paketrate vermieden werden.

3. Technische Grundlagen

Das folgende Kapitel erläutert die technischen Grundlagen, welche für die Entwicklung und Evaluierung des Systems relevant sind. Es beginnt mit einer Analyse der Lichtsteuerprotokolle Art-Net und DMX512, deren praktischer Einsatz an einem exemplarischen Lichtsystem erläutert wird. Darauf folgen die Grundlagen der Netzwerktechnik und eine Analyse der aktuellen Mobilfunkstandards.

3.1 Lichtsteuerung

3.1.1 DMX512

Digital Multiplex (DMX) wird in der professionellen Licht- und Veranstaltungstechnik eingesetzt, um Scheinwerfer, Dimmer und weitere Bühnentechnik digital anzusteuern. In der Regel übermittelt ein Lichtpult damit Steuerdaten an mehrere miteinander verbundene Empfänger.

Der grundlegende DMX512-Standard wurde im Jahr 1990 vom United States Institute for Theatre Technology (USITT) veröffentlicht. Basierend auf diesen Spezifikationen erarbeitete der Normenausschuss Bühnentechnik in Theatern und Mehrzweckhallen (FNTh) im Jahr 2000 die deutsche Norm DIN 56930-2 „Bühnenlichtstellsysteme Teil 2: Steuersignale“. Inzwischen ist das American National Standards Institute (ANSI) für die Verwaltung zuständig. Sie wurde zuletzt im Jahr 2024 aktualisiert und trägt die Bezeichnung E1.11[10].

Hardware, Datenleitungen und Anschlüsse

Die DMX512-Schnittstelle basiert auf einer leicht modifizierten RS-485-Schnittstelle und erfordert für die Kommunikation drei Adern: eine Masseleitung (GND) sowie zwei verdrehte Datenleitungen (A und B). Die serielle Signalübertragung erfolgt symmetrisch mit einem Spannungspegel von 0 V bis 5 V. Bei der symmetrischen Übertragung sendet die Quelle neben dem eigentlichen Signal zeitgleich ein invertiertes Referenzsignal. Der Empfänger invertiert dieses Signal wieder zurück und gleicht es ab. Durch dieses Prinzip lassen sich auf dem Übertragungsweg entstandene elektromagnetische Störungen auslöschen.

Die Verkabelung der Geräte erfolgt in der Praxis in Reihe. Das Signal wird dabei vom Sender durch die einzelnen Empfänger geschleift. Laut der Norm dürfen innerhalb einer solchen Signalkette höchstens 32 Empfänger betrieben werden, wobei die Gesamtlänge der Kabelstrecke auf maximal 1200 Meter begrenzt ist. Für einen fehlerfreien Betrieb muss am letzten Gerät der Kette ein Abschlusswiderstand von 120 Ohm zwischen die Leitungen A und B geschaltet werden [11, S. 3]. Diese Terminierung dämpft Signalreflexionen am Leitungsende, die sonst zu Überlagerungen und der falschen Interpretation von Signalen bei den Empfängern führen würden [12, S. 245–247].

Hinsichtlich der Steckverbindungen schreibt die Norm eine Verwendung von 5-poligen XLR-Steckern (Abbildung 7) vor, da diese zwei zusätzlichen Pins für einen optionalen Datenkanal dienen. In der Praxis ist jedoch der 3-polige XLR-Stecker (Abbildung 6) stark verbreitet, weshalb viele Geräte in der professionellen Veranstaltungstechnik über beide Anschlussmöglichkeiten verfügen. Die XLR-Verbindungen geben die Signalrichtung dabei physisch vor:

- Stecker (männlich): DMX-Eingang am Empfänger
- Buchse (weiblich): DMX-Ausgang der Signalquelle

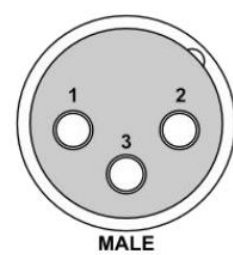
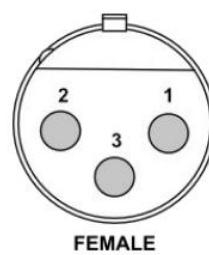
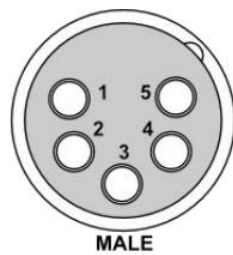
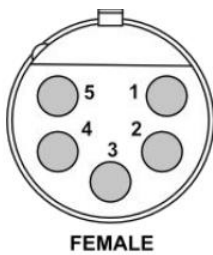


Abbildung 7: 5-Pol-DMX Anschluss [13, S. 13].

Abbildung 6: 3-Pol-DMX Anschluss [9, S. 13].

Die Belegung muss nach dem in DIN 56930-2 formulierten Schema erfolgen:

Kontakt Pin	Signalbenennung
1	Masse (GND, Schirm)
2	Dimmer Datenkanal, negatives Potential (Daten 1-)
3	Dimmer Datenkanal, positives Potential (Daten 1+)
4	Optionaler zweiter Datenkanal, negatives Potential (Daten 2-)
5	Optionaler zweiter Datenkanal, positives Potential (Daten 2+)

Tabelle 1: Die Funktionsbelegung der Pole am DMX-Anschluss [11, S. 6].

Bei der Kabelwahl ist darauf zu achten, dass das Kabel eine Leitungsimpedanz von ca. 120 Ohm aufweist, da die Signalfrequenz von DMX512 bei 125 kHz liegt. Herkömmliche XLR-Mikrofonkabel sind für diese Art der Datenübertragung ungeeignet, da sie lediglich für den Audio-Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz ausgelegt sind [12, S. 245–247].

Kanalwerte

Grundsätzlich übermittelt das DMX512 Protokoll sogenannte Kanalwerte. Ein einzelner DMX-Kanal repräsentiert dabei einen Steuer- oder Dimmerwert. Die Anzahl der benötigten Kanäle hängt von den Funktionen des jeweiligen Endgeräts ab. Ein konventioneller Theater-Stufenlinsenscheinwerfer braucht nur einen Kanal für die Helligkeitssteuerung, während ein RGB-LED-Scheinwerfer bereits drei separate Kanäle für die Steuerung der Farbanteile von Rot, Grün und Blau belegt. In der Praxis wird die Anzahl der benötigten Kanäle eines Geräts auch Footprint genannt. Damit ein Empfänger die für ihn bestimmten Signale aus dem Protokoll auslesen und umsetzen kann, muss am Gerät ein Startkanal (oder eine Startadresse) eingestellt werden.

Das DMX512-Datenprotokoll

The diagram illustrates the structure of a DALI data packet, which is a sequence of segments. The total length is indicated as 'Datenpaket (max. 512 Dimmer)'. The segments are labeled with circled numbers: 9, 1, 2, 3, 3, 3, 9, and 1. The data segments (3) contain the following information:

- Startcode**: A segment of 3 bits, with bit positions 4, 5, and 6 indicated.
- Dimmer1**: A segment of 3 bits, with bit positions 7 and 8 indicated.
- Dimmern (1 < n ≤ 512)**: A segment of 3 bits, with bit positions 4, 5, and 6 indicated.

The diagram shows the bit structure of the data segments, with labels 4, 5, 6, 7, and 8 indicating specific bit positions. The segments are separated by vertical lines, and the data segments are filled with a pattern of vertical lines representing the data bits.

Damit die Empfänger die eintreffenden Werte den richtigen Kanälen zuordnen können, folgt jede DMX-Datensequenz einem strikten zeitlichen Ablauf. Den Beginn eines Übertragungszyklus markiert ein Reset beziehungsweise Break von mindestens 88 Mikrosekunden Länge. Dieses kontinuierliche LOW-Signal unterbricht jegliche noch laufende Datenübertragung und setzt die Empfänger zurück. Darauf folgt der sogenannte Mark After Break (MAB), ein HIGH-Signal mit einer Dauer zwischen 8 Mikrosekunden und maximal einer Sekunde, das den Start der neuen Datenübertragung ankündigt. Der erste übertragene Wert nach dem MAB ist das Startbyte. Regulär handelt es sich dabei um ein Null-Byte, was dem Protokoll signalisiert, dass nun die Kanalwerte folgen. Darauf folgt die Datensequenz für die 512 Kanäle. Der Übertragungszyklus endet nach den Kanaldaten und beginnt wieder von vorne mit dem Reset [12, S. 248–249].

Pos. Nr	Beschreibung	t min	t nenn	t max	Einheit
1	Unterbrechung, Reset, BREAK, log. 0	88	88	-	µs
2	Markierung nach BREAK, MAB, log. 1	8	-	1000	µs
3	Rahmenzeit	43,12	44	44,48	µs
4	Startbit	3,92	4,0	4,08	µs
5	Niederwertigstes Bit, LSB	3,92	4,0	4,08	µs
6	Höchstwertigstes Bit, MSB	3,92	4,0	4,08	µs
7	Stopbit	3,92	4,0	4,08	µs
8	Zeit zwischen Rahmen, log. 1	0	0	1	s
9	Zeit zwischen Paketen, log. 1	0		1	s

Tabelle 2: Die Auflistung der Initialisierungs- und Übertragungszeiten des DMX512-Protokolls [11, S. 5].

Die Übertragung der Datenworte muss mit einer Datenrate von 250 kBit/s erfolgen. Die maximale Refresh-Rate, mit der die 512 Kanäle übertragen werden, beträgt 44,1Hz und lässt sich aus den Übertragungszeiten der Tabelle 2 direkt ableiten:

$$88\mu s \text{ BEAK} + 8\mu s \text{ MAB} + 44\mu s \text{ Startcode} + (512 * 44\mu s \text{ Kanäle}) = 22668\mu s$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{22668 * 10^{-6}s} = 44,1 \text{ Hz}$$

3.1.2 Art-Net

Art-Net ist ein Protokoll zur TCP/IP-basierten Übertragung von Steuerdaten in der professionellen Veranstaltungstechnik. Es wurde ursprünglich von Wayne Howell als Open-Source-Projekt entwickelt und ermöglicht die Übertragung von über 30.000 sogenannten Universen. Ein Universum entspricht dabei den 512 Steuerkanälen einer DMX-Schnittstelle. Zum Stand April 2026 ist die aktuelle Version des Protokolls Art-Net 4 und eine rechtlich eingetragene Marke der Firma Artistic Licence.

Die Nutzung des Protokolls ist grundsätzlich „royalty-free“. Es darf also jeder Hersteller oder Entwickler Art-Net ohne anfallende Lizenzgebühren in eigenen Geräten oder Softwareanwendungen implementieren [14, S. 3].

So ist es heute ein weit verbreiteter Industriestandard, den fast alle professionellen Lichtpulte standardmäßig ausgeben und einlesen können. Darüber hinaus verfügen mittlerweile auch diverse Scheinwerfer im professionellen Segment über Ethernet-Anschlüsse, um unter anderem auch Art-Net-Signale direkt empfangen und verarbeiten zu können.

Funktionen

Das Protokoll verfügt über viele Funktionen, die durch sogenannte OpCodes aufgerufen werden. Für die Lichtsteuerung ist dabei der OpCode „ArtDmx“ entscheidend, da er die Übertragung der

DMX-Kanalwerte ankündigt. Bei dieser Kommunikation wird grundlegend zwischen zwei Gerätetypen unterschieden: Ein Controller fungiert als Signalquelle und stellt in der Regel ein Lichtpult oder eine Softwarelösung dar. Ein Node (Knotenpunkt) hingegen ist das empfangende Endgerät im Netzwerk, welches die IP-basierten Art-Net-Datenpakete in DMX512-Signale übersetzt. Eine Node kann auch zum Einlesen eines DMX512-Signals dienen.

Art-Net-fähige Geräte können sich mittels der OpCodes „ArtPoll“ und „ArtPollReply“ im Netzwerk identifizieren, ihre Adressen bekannt geben und Statusinformationen austauschen. Über die Funktionen der Kanaldatenübertragung und Geräteerkennung hinaus unterstützt das Protokoll weitere Anwendungen, die im professionellen Produktionsumfeld von Bedeutung sind. Unter anderem können netzwerkbasierte Timecode-Informationen zur zeitlichen Synchronisation von Shows übertragen und verbundene Endgeräte über das Netzwerk mit Software-Updates zu versorgt werden [14, S. 1–17].

Identifikation und Aufbau des ArtDmx-Pakets

Da das Art-Net-Protokoll eine Vielzahl von Funktionen unterstützt, liegt der Fokus in diesem Abschnitt auf der Übertragung von DMX-Universen anhand des OpCodes ArtDmx. Das Verständnis von des Aufbaus dieses Pakets ist entscheidend für die Implementierung der Ausgabe des DMX512-Signals am Hardware-Prototypen.

Die Kommunikation erfolgt verbindungslos über das User Datagram Protocol (UDP) auf dem Netzwerkport 6454. Auf die tiefergehenden netzwerktechnischen Aspekte von UDP wird in Kapitel 3.2.4 gesondert eingegangen.

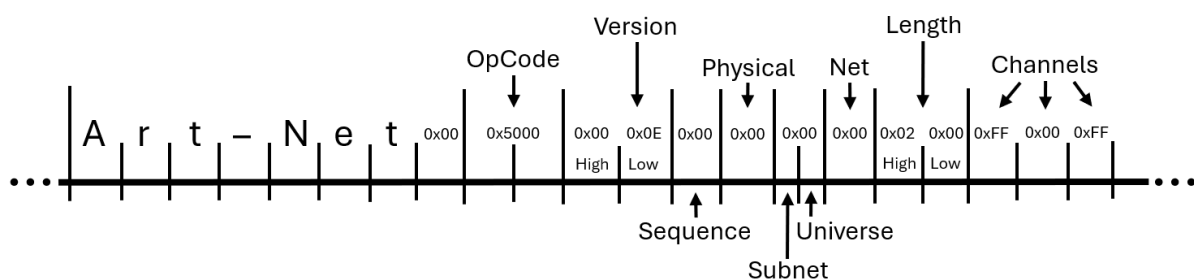


Abbildung 9: Der Aufbau des ArtDmx-Pakets im Byte-Raster [14, S. 62–64].

Die Abbildung 9 zeigt die Struktur des ArtDmx-Pakets. Es beginnt mit einem 8-Byte langen Character-Array, das die Kennung „Art-Net“ sowie eine abschließende Null-Terminierung (0x00) enthält. Darauf folgt der OpCode, der für die Übertragung von Kanaldaten den Hexadezimal-Wert 0x5000 aufweisen muss. Daraufhin werden zwei Bytes für die Versionsinformationen des Protokolls gesendet. Es folgt ein Byte für eine Sequenznummer, die der Überprüfung der korrekten

Paketreihenfolge dient. Sie wird pro gesendetes Paket um den Wert 1 erhöht (von 0x01 bis 0xFF) und beginnt anschließend wieder von vorne.

Das nächste Byte im Protokoll liefert Informationen über den genutzten physischen Port. Daran schließt sich ein Byte zur Adressierung (SubUni) an, bei dem die oberen vier Bits das Subnet (0 bis 15) und die unteren vier Bits das adressierte Universum (0 bis 15) definieren. Danach folgt ein weiteres Byte für die übergeordnete Adressierungsebene. Vor den eigentlichen Kanalwerten wird noch deren Anzahl übermittelt, wobei die Übertragung nach dem Prinzip „High Byte first“ erfolgt. In der Praxis senden Art-Net-Geräte hier meist den vollen Datensatz von 512 Kanälen. Den Abschluss des ArtDmx-Pakets bilden schließlich die Kanalwerte in der zuvor definierten Menge [14, S. 62–64].

3.1.3 Ein typisches Lichtsystem mit Art-Net und DMX512

Um die praktische Funktionsweise der beschriebenen Protokolle besser nachzuvollziehen, betrachten wir im Folgenden ein exemplarisches Lichtsetup. Als Signalquelle dient ein Lichtpult, das über eine Ethernet-Verbindung in ein lokales Netzwerk eingebunden ist. Zunächst muss im Pult ein sogenannter Patch angelegt werden. In diesem Konfigurationsschritt werden dem Pult die verwendeten Lampentypen, die Anzahl der Geräte sowie deren zugewiesene DMX-Startadressen und Universen mitgeteilt.

Es sendet nun die Steuerdaten netzwerkbasierend via Art-Net an einen Node. Dieser Node fungiert als Übersetzer zwischen dem Art-Net-Protokoll (Ethernet) und dem seriellen DMX512-Signal (XLR). Das im Beispiel verwendete Gerät verfügt über vier physische DMX-Ausgänge. Die Nummerierung repräsentiert in der Regel das dort ausgegebene Art-Net-Universum, kann aber auch konfiguriert werden.

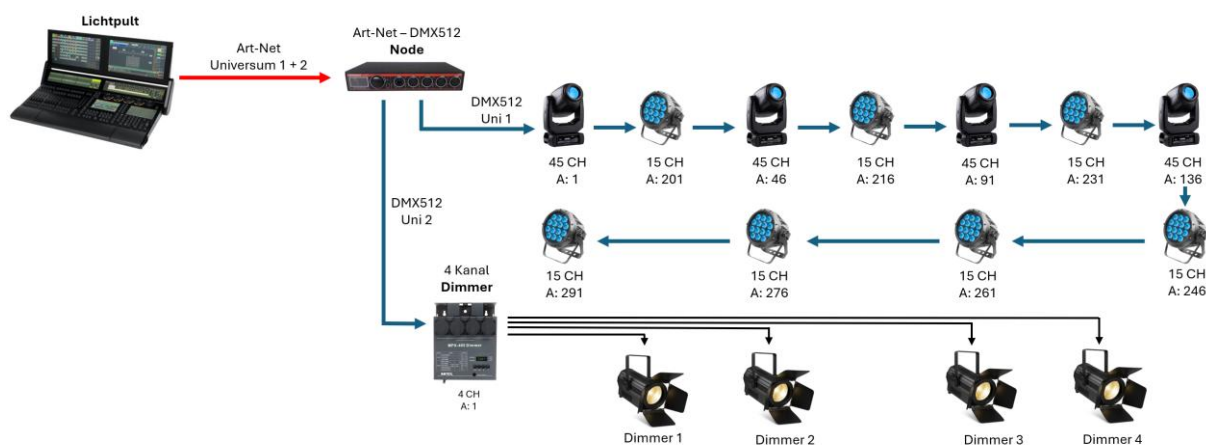


Abbildung 10: Ein exemplarisches Lichtsystem aus Lichtpult, Node, Dimmer und Scheinwerfern[15], [16], [17], [18], [19], [20].

Die Abbildung 10 zeigt, dass an dem ersten Port der Node das erste Universum anliegt, welches die Scheinwerfer in z. B. einem Bühnendach steuert. Dort befinden sich vier bewegte Scheinwerfer (Moving Heads) des Typs Robe Painte sowie sieben ExPolite TourLEDs. Für die Adressierung ist hier der Footprint entscheidend. Ein technisch komplexer Moving Head belegt für Funktionen wie Intensität, Farbmischung, Pan (horizontale Bewegung), Tilt (vertikale Bewegung) und Goborad (Lichtmuster) jeweils eigene Steuerkanäle.

Ein einzelner Robe Painte Moving Head weist einen Footprint von 45 Kanälen auf. So werden bei vier Geräten insgesamt 180 Kanäle benötigt und belegen im ersten Universum den durchgehenden Adressbereich von 1 bis 180. Die sieben TourLEDs haben einen Footprint von jeweils 15 Kanälen (insgesamt 105 Kanäle) und bekommen den Adressbereich von 201 bis 305 zugewiesen. Die Reihenfolge der DMX-Verkabelung von Scheinwerfer zu Scheinwerfer spielt dabei keine Rolle. Jedes Gerät in der Signalkette empfängt kontinuierlich die Daten des gesamten Universums, aber verarbeitet diese nur ab seiner individuell eingestellten Startadresse.

In der Abbildung 10 gibt es zusätzlich vier konventionelle Halogen-Stufenlinsen, welche z. B. vor der Bühne montiert sind. Da bei diesen Scheinwerfern die Helligkeit nicht intern, sondern direkt über den Dimmerstrom geregelt wird, sind sie an einen externen 4-Kanal-Dimmer angeschlossen. Jeder Kanal dieses Dimmers steuert eine der Stufenlinsen. Der Dimmer ist via DMX512 mit dem zweiten Port der Node verbunden, an dem das zweite Art-Net-Universum anliegt. Da der Dimmer lediglich vier Steuerkanäle für die Helligkeit benötigt, belegt er in diesem zweiten Universum nur den schmalen Adressbereich von Kanal 1 bis 4.

In diesem exemplarischen Setup ließen sich theoretisch noch alle Komponenten gemeinsam in einem einzigen DMX-Universum adressieren. Die Aufteilung auf zwei Universen dient in diesem Fall primär der örtlichen Strukturierung der Anlage. Denkt man jedoch an größere Bühnenproduktionen, wird die Kapazitätsgrenze eines DMX-Universums schnell erreicht. Bei einem Footprint von 45 Kanälen pro Gerät wäre ein einziges Universum bereits mit elf Moving Heads ausgeschöpft. So ermöglicht die Verwendung von Art-Net die Realisierung größerer Lichtsysteme in der Veranstaltungstechnik.

3.2 Netzwerk

Die netzwerktechnischen Aspekte der Datenübertragung zwischen dem Sender, Vermittlungsserver und dem Empfänger im Mobilfunknetz sind von zentraler Bedeutung für diese Arbeit. Das folgende Kapitel erläutert die grundlegenden Übertragungsmedien, Standards und Protokolle, auf denen das System aufgebaut wird.

Als Leitfaden dient dabei das praxisnahe TCP/IP-Referenzmodell. Entlang der Schichten dieses Modells werden zunächst die Prinzipien des Netzzugangs und der lokalen Datenübertragung betrachtet. Darauf aufbauend erfolgt eine Analyse der Internetschicht, wobei ein besonderer Fokus auf dem Internet Protocol (IPv4) und der Network Address Translation (NAT) liegt. Des Weiteren werden die Transportprotokolle TCP und UDP erläutert. Abschließend werden die qualitätsbestimmenden Faktoren für die Echtzeitübertragung von Steuerdaten, Latenz, Ping und Jitter, definiert. Diese Werte sind entscheidend für die spätere Evaluierung des Systems.

3.2.1 Das TCP/IP-Referenzmodell

Um die Komplexität von Datennetzwerken zu veranschaulichen, werden Kommunikationsabläufe in abstrakte Schichten unterteilt. Zur Einordnung existieren das theoretische, siebenschichtige OSI-Referenzmodell sowie das vierschichtige TCP/IP-Modell. Da das TCP/IP-Modell den praxisrelevanten Standard des heutigen Internets abbildet und die in dieser Arbeit verwendeten Protokolle darauf basieren, dient es als Leitfaden des folgenden Kapitels.

TCP/IP und OSI-Modell im Vergleich		
OSI-Schicht	TCP/IP-Schicht	Beispiel
7. Anwendung	4. Anwendung	HTTP, FTP, SMTP, POP, ... TLS, SOCKS
6. Darstellung		
5. Sitzung		
4. Transport	3. Transport	TCP, UDP, ...
3. Vermittlung	2. Internet	IP (IPv4, IPv6), ICMP (über IP)
2. Sicherung	1. Netzzugang	Ethernet, IEEE.802.11, ...
1. Bitübertragung		

Abbildung 11: Der Vergleich zwischen den Netzwerk-Referenzmodellen mit Beispielen [21]

Die unterste Ebene des Modells, die Netzzugangsschicht, übernimmt die physikalische Übertragung von in Datenpaketen zusammengefassten Bitfolgen. Darauf baut die Internetschicht auf, die das Routing übernimmt und so die Datenkommunikation zwischen beliebigen Endgeräten über Netzwerkgrenzen hinweg ermöglicht. Die darüberliegende Transportschicht regelt den

eigentlichen Datenaustausch zwischen den Programmen auf unterschiedlichen Rechnern, der je nach Anforderung und Protokoll verbindungsorientiert oder verbindungslos erfolgen kann. Den Abschluss bildet die Anwendungsschicht: Sie fasst die obersten drei OSI-Schichten zusammen und fungiert als direkte Schnittstelle zu den eigentlichen Anwendungsprogrammen, die über das Netzwerk miteinander kommunizieren [22, S. 48–51].

3.2.2 Physikalische Verbindungen und Netzzugang

Physikalische Verbindungen im Netzwerk

Die unterste Ebene des TCP/IP-Modells bildet die Netzzugangsschicht. Sie definiert die Übertragung logischer Bitfolgen über ein physikalisches Kommunikationsmedium. Hierbei wird grundlegend zwischen kabelgebundenen und drahtlosen Medien unterschieden. Kabelgebundene Verbindungen bieten höchste Datenraten und Zuverlässigkeit bei minimalen Fehlerraten, verursachen jedoch einen hohen Aufwand sowie Kosten bei der physischen Verlegung. Drahtlose Übertragungsverfahren, wie beispielsweise der Mobilfunk, nutzen hingegen das elektromagnetische Spektrum zur flexiblen Signalübertragung im Raum. Sie sind für den mobilen Einsatz prädestiniert, weisen jedoch durch physikalische Störeinflüsse wie Reflexionen, Hindernisse oder atmosphärische Dämpfung eine höhere Fehleranfälligkeit auf [22, S. 45–48]. Das zu entwickelnde System bedient sich beider Ansätze, jedoch erfolgt die detaillierte Betrachtung der Mobilfunkschnittstelle gesondert in Kapitel 3.3.

Local Area Networks (LAN) und Wide Area Networks (WAN)

Ein LAN beschränkt sich in seiner Dimension auf einen begrenzten Bereich, in dem Endgeräte miteinander verbunden werden. Hier kommen überwiegend kupferbasierte Twisted-Pair-Kabel (Ethernet) zum Einsatz. Die Identifikation der Endgeräte erfolgt über sogenannte Media-Access-Control-Adressen (MAC-Adressen), wobei ein Netzwerk-Switch die Datenpakete lokal zustellt.

Da in dem System aus einem lokalen Netzwerk heraus die Verbindung zu einem Server hergestellt werden muss, der außerhalb des LANs der Sendeinstanz liegt, führt dieser Weg über das Wide Area Network (WAN). Ein WAN ist der Zusammenschluss lokaler Netzwerke zu einem übergeordneten Netzwerkverbund. Dieser Netzwerkverbund kann eine interkontinentale Spannweite erreichen. Das weltweit bekannteste dieser WANs ist das globale Internet, welches auf den TCP/IP-Protokollen aus den höheren Schichten basiert. Für die reibungslose Weiterleitung der Daten sorgen dabei Zwischensysteme wie Router und Paketvermittler [22, S. 361–362].

3.2.3 IPv4 und Network Address Translation NAT

Die im vorangegangenen Abschnitt erwähnte hardwarenahe MAC-Adressierung reicht nicht aus, um Datenpakete über Netzwerkgrenzen hinweg durch ein Wide Area Network zu leiten. Diese Aufgabe des netzübergreifenden Routings übernimmt im TCP/IP-Modell die Internetschicht. Das gängige Protokoll auf dieser Ebene ist das Internet Protocol in der Version 4 (IPv4).

IPv4 und Adressknappheit

IPv4 nutzt eine 32-Bit-Adresse, um jedes Endgerät und jeden Router an seiner jeweiligen Netzwerkschnittstelle eindeutig zu identifizieren. Verfügt ein Endgerät über mehrere Netzwerkschnittstellen wie beispielsweise WLAN und Ethernet, wird jeder dieser aktiven Schnittstellen eine eigene IP-Adresse zugewiesen. Die Darstellung der 32-Bit-Adresse erfolgt standardmäßig in der Dezimalschreibweise, bei welcher die vier Bytes der Adresse durch jeweils einen Punkt voneinander getrennt werden. So lässt sich die exemplarische IPv4-Adresse 128.208.2.151 als 32-Bit-Hexadezimalzahl 80D00297 ausdrücken [23, S. 518–523].

Durch die feste Länge von 32 Bit lässt sich ableiten, dass die Kapazität dieser IP-Adressen auf $2^{32} = 4,29$ Milliarden begrenzt ist. In der Frühphase des Internets ließ sich diese Limitierung noch dadurch handhaben, dass ein Internet Service Provider (ISP) einem Nutzer bei einer Einwahlverbindung nur temporär eine öffentliche IP-Adresse zuwies. Nach Beendigung der Sitzung stand diese dann anderen Nutzern zur Verfügung. In der heutigen Infrastruktur, in der private Haushalte und Büros eine durchgängig aktive Netzwerkanbindung benötigen, ist dieses Verfahren nicht mehr flächendeckend anwendbar. Die daraus resultierende Adressknappheit hat dazu geführt, dass öffentliche IPv4-Adressen zu einer knappen Ware geworden sind, deren Preis bei bis zu 60 US-Dollar pro Adresse liegen kann.

Es wurde inzwischen IPv6 eingeführt, welches mit 128 Bit $= 2^{128} = 340,28$ Sextillionen individuelle Adressen zur Verfügung stellen kann. Dennoch ist das ältere IPv4-Protokoll in der Praxis nach wie vor dominant. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass sich noch immer ältere Endgeräte im Umlauf befinden, die ausschließlich IPv4 unterstützen. Andererseits erweist sich die Handhabung von IPv4-Adressen für den Endnutzer, insbesondere im Bereich der Konfiguration lokaler Netzwerke, aufgrund der kürzeren Ziffernfolge als komfortabler und fehlerresistenter [24].

Network Address Translation (NAT) und Carrier-Grade NAT

Aufbauend auf der zuvor beschriebenen Problematik der IPv4-Adressknappheit kommt das Verfahren der Network Address Translation (NAT) zum Einsatz. Dieser Mechanismus ist standardmäßig in gängigen Netzwerkroutern implementiert und ermöglicht es, dass der Router eine einzige öffentliche IP-Adresse stellvertretend für mehrere Endgeräte innerhalb seines lokalen Netzwerks nutzt.

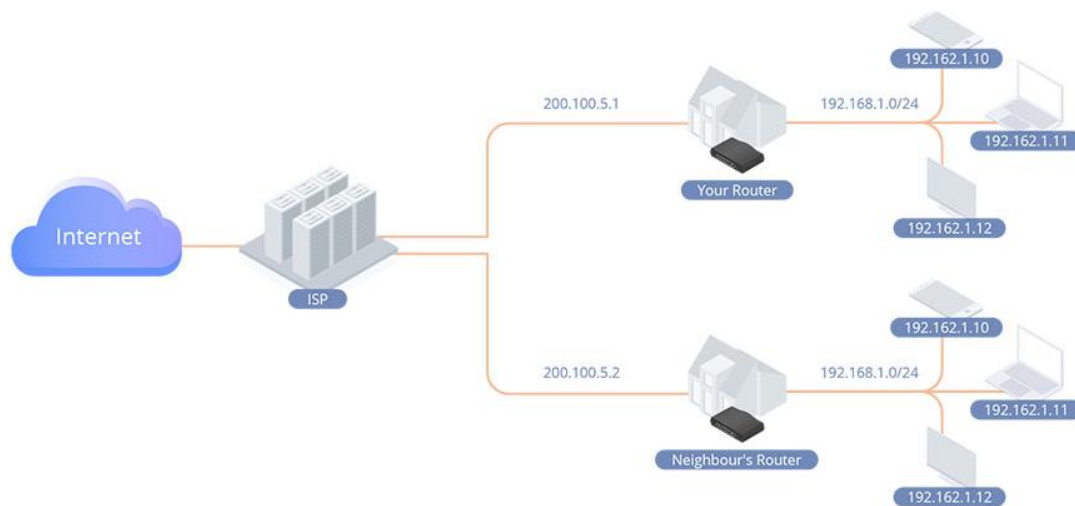


Abbildung 12: Eine Darstellung von einfachem NAT mit einer öffentlichen IP-Adresse für jeden Router [24].

Bei ausgehendem Datenverkehr eines Endgeräts greift der NAT-Mechanismus des Routers ein. Er ersetzt die private Absender-IP-Adresse des LAN-internen Geräts durch die öffentliche des Netzwerks. Dafür unterhält der Router eine sogenannte NAT-Tabelle. In dieser wird protokolliert, welches lokale Endgerät welchen externen Datenverkehr verursacht und dementsprechende Antworten aus dem WAN erwartet. Trifft anschließend der Antwort-Traffic am Router ein, kann dieser anhand der NAT-Tabelle dem korrekten internen Endgerät zugeordnet und an dessen private IP-Adresse weitergeleitet werden. Wenn jedoch nicht angeforderter Datenverkehr von außen eintrifft, kann dieser geblockt werden, was NAT auch zu einem Sicherheitsfeature macht [24], [25, S. 229–230].

Carrier-Grade NAT (CGNAT), auch als Large-Scale NAT bezeichnet, basiert auf demselben Prinzip der Adressübersetzung wie herkömmliches NAT. Jedoch wird der Mechanismus eine hierarchische Ebene weiter in die Netzwerkinfrastruktur des Internet Service Providers verschoben. Wie in Abbildung 13 veranschaulicht, wird dieses Verfahren eingesetzt, damit sich mehrere Kunden eines ISPs eine einzige öffentliche IP-Adresse teilen können.

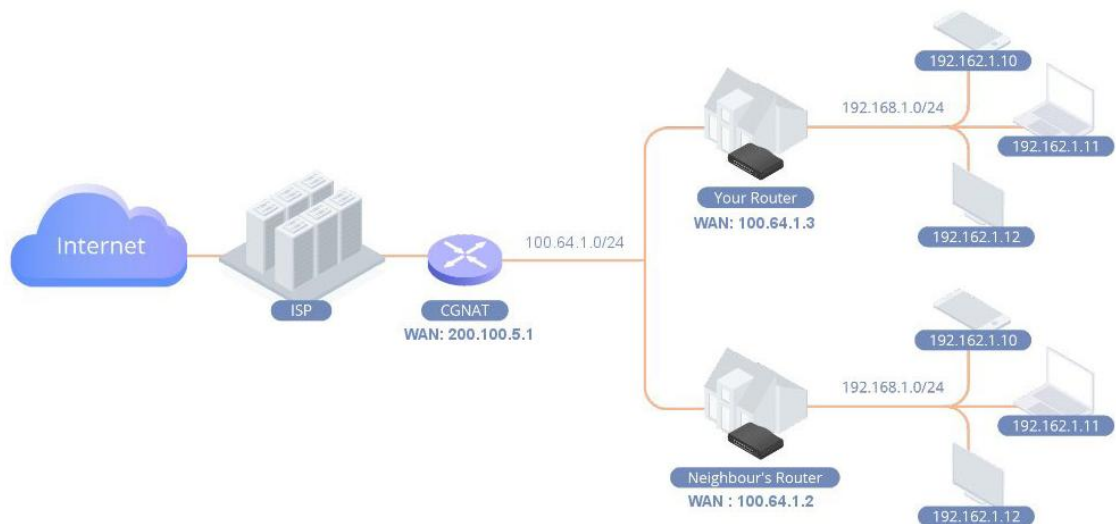


Abbildung 13: Die Darstellung von CGNAT mit der öffentlichen IP-Adresse des ISPs [24].

Dabei führt der Provider in seinem Kernnetz eine übergeordnete NAT-Tabelle für die Router seiner Endkunden. Sobald Datenpakete in das öffentliche WAN gesendet werden, ersetzt das CGNAT des ISPs die IP-Adresse des Kundenrouters durch die öffentliche IP-Adresse des Providers. Wie beim lokalen NAT wird auch hier jeglicher eingehender Datenverkehr, der nicht zuvor durch eine ausgehende Verbindung des Kunden explizit angefordert wurde, bereits auf der Ebene des ISPs abgeblockt und verworfen [24].

Für das zu entwickelnde System wird an dieser Stelle deutlich, warum der Einsatz eines Servers mit einer öffentlichen IP-Adresse als Vermittlungsinstanz erforderlich ist. Da der Hardware-Prototyp innerhalb des Mobilfunknetzes keine eigene öffentliche IP-Adresse zugewiesen bekommt, muss er sich an eine von außen erreichbare Gegenstelle wenden, um die Art-Net-Daten zu beziehen. Zwar bestünde für die Sendeinstanz theoretisch die Möglichkeit, bei einem ISP eine öffentliche IP-Adresse zu erwerben. Diese wäre jedoch fest an ein lokales Netzwerk gebunden. Für die Skalierbarkeit des Systems, im Sinne des mobilen Einsatzes der Sendeinstanz, wäre dieser Ansatz begrenzend.

3.2.4 TCP, UDP und Sockets

Die Transportschicht des TCP/IP-Modells bildet die Schnittstelle zur Anwendungsebene und ist für den paketbasierten Datentransport zuständig. Dabei werden Datenströme der Anwendung in einzelne Segmente unterteilt, um sie über das Netzwerk zu übertragen. In der Praxis dominieren hierbei die Protokolle TCP und UDP, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit bedienen.

Weil das Art-Net-Protokoll auf UDP basiert, liegt der Fokus im Folgenden auf diesem verbindungslosen Ansatz. Der Mechanismus von TCP wird der Vollständigkeit halber grob erläutert. Den Abschluss des Kapitels bildet die Betrachtung von Network Sockets als Endpunkte, die diese Transportprotokolle über sogenannte Ports mit der eigentlichen Software verbinden.

Transmission Control Protocol (TCP)

TCP ist ein verbindungsorientiertes Protokoll. Hierbei wird die Kommunikation zwischen zwei Endgeräten (Hosts) nach einer festen Routine auf- und abgebaut und die Datenübertragung kontinuierlich durch eine Flusskontrolle auf ihre Vollständigkeit geprüft.

Diese Flusskontrolle wird über beidseitiges Bestätigen der Hosts umgesetzt, indem Sequenznummern und ACK-Nummern immer einer strikten Logik folgen. Diese Bestätigungen erhöhen die Anzahl der an zu übertragenden Paketen zwischen zwei Hosts. Damit wird ein Datenverlust auf Kosten der Übertragungsgeschwindigkeit minimiert [25, S. 205–211]. So wird schnell erkennbar, warum TCP für eine Übertragung in Echtzeit nicht geeignet ist.

User Datagram Protocol (UDP)

Im Gegensatz zu TCP verzichtet UDP als verbindungsloses Protokoll auf jegliche Überprüfungs- und Bestätigungsmechanismen zwischen Sender und Empfänger, was die Übertragungsgeschwindigkeit erheblich steigert.

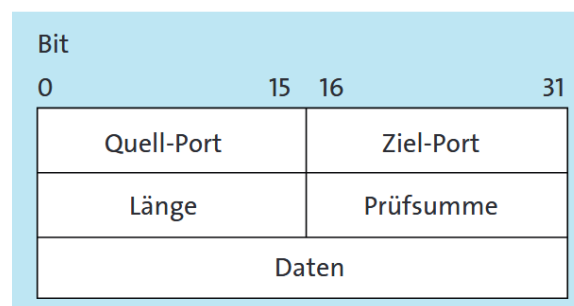


Abbildung 14: Der Aufbau eines UDP-Headers [25, S. 212] Fig. 6.5.

Der UDP-Header in Abbildung 14 enthält im Wesentlichen den Quell- und Ziel-Port, um die Daten auf Sender- und Empfängerseite den jeweiligen Anwendungen korrekt zuordnen zu können. Zudem wird im Header die Gesamtlänge des Datenpakets kommuniziert. Unmittelbar an diesen Header schließen sich die eigentlichen Nutzdaten in der definierten Länge an.

Um verifizieren zu können, ob ein eintreffendes Paket während der Übertragung beschädigt wurde, verfügt auch UDP über eine Prüfsumme (Checksum), für deren Berechnung die Metadaten aus der tieferliegenden IP-Schicht einbezogen werden. Sie setzt sich zusammen aus der IP-Adresse des Senders und des Empfängers, einem 8-Bit-Leerfeld (bestehend aus acht Nullen), der Protokoll-ID und der Länge der zu übertragenden Daten [25, S. 211–213].

So eignet sich UDP primär für zeitkritische Anwendungen, wie beispielsweise die Übertragung von Ton- und Videostreams, bei denen eine konstante Datenrate wichtig ist. Zwar wird ein potenzieller Datenverlust einzelner Pakete bewusst in Kauf genommen, jedoch zugunsten einer geringeren Latenz. Das begründet, warum Art-Net auf diesem Übertragungsprotokoll basiert und eine niedrige Paketverlustrate wichtig für diese Anwendung ist.

Ports und Sockets

Sockets bilden die Schnittstelle zwischen Anwendungsschicht und Transportschicht im TCP/IP-Modell. Da Anwendungen und Programme auf einem Endgerät nicht direkt über die IP-Adresse kommunizieren können, kommen hier sogenannte Ports zum Einsatz.

Ein Port ist in der Regel einer bestimmten Anwendung oder einem spezifischen Kommunikationszweck zugeordnet. Er ist für die Annahme und Abgabe der Daten zuständig und ermöglicht die simultane Nutzung mehrerer Netzwerkdienste.

Insgesamt stehen 1 bis 65.535 mögliche Ports zur Verfügung. Viele dieser Ports wurden von der Internet Assigned Numbers Authority (IANA) festen Diensten und Zwecken zugeordnet:

- **Bereich 0-1023:** Für wichtige Dienste festgelegte „Well-known-Ports“ wie z.B. Secure-Shell-Fernsitzung (SSH) an Port 22 und HTTPS-Webserver an Port 443.
- **Bereich 1024-49151:** Für bei der IANA registrierte Anwendungen. Art-Net an Port 6454 fällt in diese Kategorie, ist aber nicht offiziell registriert. Der Bereich von 6447 bis 6454 steht in dem Verzeichnis der IANA zum Zeitpunkt dieser Arbeit als „unassigned“ [26].
- **Bereich 49152-65535:** Zur freien Verfügung

Erst die Kombination aus der IP-Adresse des Rechners und dem spezifischen Port der Anwendung bildet einen Kommunikationsendpunkt, den sogenannten Socket.

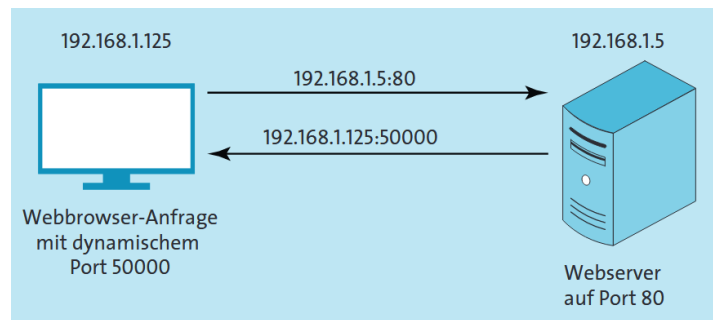


Abbildung 15: Die Rechnerkommunikation anhand von Sockets [25, S. 213] Fig. 6.6.

Im Programmaufruf eines Sockets werden die IP-Adresse und der Port durch einen Doppelpunkt getrennt: 192.168.178.141:6454. Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, kann es durchaus vorkommen, dass die Kommunikation zwischen beispielsweise einem Webserver und einem Client auf unterschiedlichen Ports stattfindet [25, S. 211–217].

Sockets werden in dem Programm des Hardware-Prototypen und der Software des Servers eine zentrale Rolle spielen, da an diesem Punkt die Art-Net-Pakete zur Verarbeitung anliegen.

3.2.5 Latenz, Ping und Jitter

Da die Übertragung der Pakete in Echtzeit angestrebt wird, müssen bestimmte Anforderungen an die Netzwerkleistung erfüllt werden. Die beiden wichtigsten Messgrößen sind dafür die Netzwerklatenz und der Jitter.

Die Dauer eines Datentransfers zwischen zwei Punkten in einem Netzwerk wird als Latenz bezeichnet. In der Netzwerktechnik wird stets eine niedrige Latenz angestrebt, da sie entscheidend für den Datendurchsatz und die Echtzeitfähigkeit zwischen den Komponenten ist.

Die Latenz wird in Millisekunden angegeben und beschreibt die Zeitspanne, die zwischen dem Beginn eines Sendevorgangs im Quellsystem und dem Abschluss des Empfangs im Zielsystem vergeht. Zur Messung wird häufig die sogenannte Round Trip Time (RTT) ermittelt, indem mittels eines Ping-Befehls ein Paket zum Zielserver und wieder zurückgeschickt wird. Der RTT-Wert beschreibt somit die Dauer des Hin- und Rückwegs zusammen und stellt damit nur einen Indikator für die Latenzzeit dar. Hierfür kommt das Echo-Anfragepaket des Internet Control Message Protocol (ICMP) zum Einsatz [27].

Jitter bezeichnet die Schwankung der Latenzzeit und ist aussagekräftig über die Stabilität des Netzwerkes. Die Latenz sollte für einen geringen Jitter möglichst konstant sein, da hier ein hoher Wert zu Paketverlust führen kann [27].

3.3 Mobilfunk

Da die Datenübertragung via Mobilfunk eine zentrale Rolle in dieser Arbeit einnimmt, ist ein fundierter Überblick über die grundlegende Architektur von Mobilfunksystemen erforderlich. Um zunächst ein Verständnis dafür zu schaffen, wie die Verbindungsqualität und die Dienstgüte in Mobilfunknetzen gesteuert und bewertet werden, wird zu Beginn dieses Kapitels das Konzept der Quality of Service (QoS) erläutert. Im Anschluss werden die relevanten Mobilfunkgenerationen 2G, 4G (LTE) und 5G im Detail betrachtet. Obwohl sich das 2G-Netz im sukzessiven Abschaltprozess befindet, wird es einführend behandelt, da es wichtige Basisstrukturen für die nachfolgenden Standards etablierte. Der 3G-Standard findet in dieser Arbeit bewusst keine weitere Berücksichtigung, da dessen Infrastruktur in Deutschland bereits bis zum Jahr 2021 von sämtlichen Netzbetreibern vollständig zurückgebaut wurde [28].

3.3.1 Quality of Service (QoS)

Der Einsatz des Mobilfunknetzes als Übertragungsmedium birgt die Herausforderung, dass die Luftschnittstelle im Gegensatz zu einem kabelgebundenen LAN ein geteiltes Kommunikationsmedium mit begrenzten Kapazitäten darstellt. Insbesondere im Kontext von Großveranstaltungen, bei denen sich zeitgleich viele Menschen in dieselbe Mobilfunkzelle einwählen wie der Hardware-Prototyp, muss eine zuverlässige Funktion des Lichtsteuerungssystems gewährleistet bleiben.

Traditionell beschrieb der Begriff der Quality of Service das Qualitätserleben eines bestimmten Dienstes, wie beispielsweise einen Telefonanruf, aus der subjektiven Endnutzerperspektive. Im Fokus stand das Maß an technischen Einschränkungen, etwa bezüglich Latenzzeiten oder Paketverlusten, das für derartige Echtzeitsdienste noch als akzeptabel galt.

Mit der Entwicklung vom reinen Sprach- zum Datenübertragungsdienst, bei denen zunehmend auch Maschinen als Empfänger agieren, ergeben sich neue Möglichkeiten. Aus der heutigen Perspektive des Netzbetreibers beschreibt QoS die Fähigkeit, verschiedene Arten von Datenverkehr (Traffic) zu erkennen, diese voneinander zu unterscheiden und sie netzseitig unterschiedlich zu behandeln [29].

So wurden in den betrachteten Mobilfunkstandards unterschiedliche Methoden zur Klassifizierung von Nutzern und die Priorisierung der jeweiligen Verbindung entwickelt.

Im LTE-Standard erfolgt diese Einordnung über sogenannte QoS Class Identifier (QCI). Jedem Datenstrom wird dabei ein spezifisches Profil in Form eines numerischen Wertes im Bereich von 0 bis 255 zugewiesen. Anhand dieses QCI-Wertes kann das netzseitige Übertragungssystem

identifizieren, um welche Art von Datenverkehr es sich handelt und welche Priorität der Übertragung beigemessen werden muss.

Ein solches QCI-Profil definiert sich über vier Parameter: den Ressourcentyp, die Prioritätsbehandlung, die maximal erlaubte Paketverzögerung sowie die maximale Paketfehlerrate. Beim Ressourcentyp wird dabei grundlegend zwischen Verbindungen mit einer garantierten Bitrate (Guaranteed Bit Rate, GBR) und solchen mit einer nicht garantierten Bitrate (Non-GBR) unterschieden.

Zeitkritische Dienste wie die Sprach- oder Fahrzeugkommunikation erfordern zwingend eine GBR-Verbindung, um eine kontinuierliche und verzögerungsfreie Übertragung sicherzustellen. Im Gegensatz dazu können gepufferte Dienste, wie Messaging oder Dateitransfer, problemlos über Non-GBR-Verbindungen abgewickelt werden. Bei diesen Anwendungsfällen wirkt sich eine leicht verzögerte Übertragungsdauer nicht unmittelbar auf das Qualitätserlebnis des Dienstes aus [30, S. 19–21].

Die folgende Tabelle veranschaulicht anhand von vier exemplarischen QCI-Klassen, wie diese Parameter zur Klassifizierung unterschiedlicher Dienste kombiniert werden:

QCI	Typ	Priorität	Paket-verzögerung	Paket-fehlerate	Beispieldienste
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Sprachkommunikation
2	GBR	4	150 ms	10^{-3}	Videokommunikation
3	GBR	3	50 ms	10^{-3}	Echtzeitspiele, Fahrzeugkommunikation
6	non-GBR	6	300 ms	10^{-6}	(gepufferte) Videoübertragung, TCP-Basierte Dienste: WWW, Filesharing, Mail, Chat ect.

Tabelle 3: Vier exemplarische QCI-Klassen im LTE-Mobilfunkstandard

3.3.2 GSM und EDGE

Das Global System for Mobile Communications (GSM), auch als 2G bezeichnet, bildet die technologische Grundlage für die aktuellen Mobilfunkstandards LTE und 5G. Obwohl sich das 2G-Netz bereits im Abschaltprozess befindet, wird die Infrastruktur heute noch teilweise für die Machine-to-Machine-Kommunikation und für verbliebene Altgeräte aufrechterhalten [31, S. 391]. Für die meisten Endnutzer ist dieser Mobilfunkstandard kaum noch relevant. Eine Erhebung von Opensignal zeigte, dass deutsche Nutzer im Jahr 2024 nur noch 2,4 Prozent ihrer mobilen Online-Zeit im 2G-Netz verbrachten [32].

Die International Telecommunication Union (ITU) definierte den GSM-Standard zunächst für die mobile Sprach- und Datenkommunikation auf europäischer Ebene. Um einheitliche Standardisierungen und Weiterentwicklungen auf internationaler Ebene voranzutreiben, wurde das 3rd Generation Partnership Project (3GPP) gegründet. Es ist bis heute die maßgebliche Instanz für die internationale Weiterentwicklung aller nachfolgenden Mobilfunkgenerationen [31, S. 395].

Das GSM-Kernnetz

Technologisch basierte GSM in seiner ursprünglichen Form auf dem leitungsvermittelnden Verfahren. Für den Aufbau des Netzes wurden bestehende ISDN-Vermittlungsknoten aus der Sprachtelefonie genutzt, deren Software für die Verwaltung von mobilen Verbindungen erweitert wurde. So konnten die Betreiber neben den klassischen Festnetzanschlüssen auch mobile Teilnehmer in die Sprachkommunikation einbinden [31, S. 392–393].

Das hinter der Luftschnittstelle liegende Kernnetz wird als Network Subsystem bezeichnet. Eine zentrale Komponente ist das Mobile Switching Center (MSC), über das sämtliche Kommunikationsverbindungen geleitet werden. Zu den Aufgaben dieser Instanz gehören der Verbindungsaufbau, die Registrierung der Endgeräte sowie das Mobility Management. Letzteres umfasst wichtige Prozesse wie die Authentifizierung der Nutzer, die Aktualisierung des Aufenthaltsortes und die Verwaltung des Wechsels zwischen verschiedenen Funkzellen (Handover) [31, S. 404–405].

Für die Identifikation der Teilnehmer muss das Network Subsystem auf eine Datenbank zurückgreifen können. Das MSC ist hierfür mit einem Visitor Location Register (VLR) verknüpft. Sobald sich ein mobiler Teilnehmer im Einzugsbereich eines bestimmten MSC aufhält, kopiert das zugehörige VLR die temporär benötigten Nutzerdaten aus dem Home Location Register (HLR).

Das HLR ist eine übergeordnete Teilnehmerdatenbank des jeweiligen Netzbetreibers. Dort sind alle vertraglichen und technischen Daten eines Kunden hinterlegt. Dazu zählt die Identifikationsnummer der SIM-Karte, die als International Mobile Subscriber Identity (IMSI) bezeichnet wird. Des Weiteren ist dort auch die Mobile Subscriber ISDN Number (MSISDN) hinterlegt, die allgemein als Handynummer bekannt ist [31, S. 409–411].

Weiterentwicklung zu EDGE

Mit zunehmender Relevanz von IP-basierter Kommunikation wie E-Mails und Websites erkannten die Netzbetreiber, dass eine Datenübertragung mit einer konstanten Bitrate ineffizient ist. Im leitungsvermittelnden Verfahren führt das in der Praxis dazu, dass beispielsweise während des Lesens einer bereits geladenen Website der Kanal für andere Teilnehmer nicht verfügbar ist. Aus diesem Grund erfolgte damals die Abrechnung nach der reinen Verbindungsdauer und nicht nach dem tatsächlich übertragenen Datenvolumen, wie bei einem Telefongespräch.

Zur Lösung dieser Ineffizienz wurde der General Packet Radio Service (GPRS) eingeführt, der die paketerorientierte Datenübertragung im Mobilfunk etablierte. Dabei senden Nutzer ihre Datenpakete nacheinander über einen Kanal, was die verfügbare Bandbreite deutlich effizienter ausnutzt. Auf der Luftschnittstelle existieren seitdem beide Varianten. Die sogenannten Traffic Channels (TCH) dienen dem klassischen leitungsvermittelnden GSM-Standard, während die Packet Data Traffic Channels (PDTCH) für den GPRS-Datenverkehr genutzt werden. Die Zuteilung der Kapazitäten auf die Kanäle kann je nach aktueller Auslastung der Funkzelle flexibel erfolgen.

Da GPRS und GSM das gleiche Übertragungsverfahren in der Luftschnittstelle nutzten, ließen sich bestehende Sendestationen in der Regel durch Softwareupdates aufrüsten. Mit dieser technologischen Neuerung etablierte sich zudem ein neues Abrechnungsmodell, das nicht mehr die reine Onlinezeit, sondern das übertragene Datenvolumen berechnete [31, S. 465–470].

Als Weiterentwicklung von GPRS wurde EGPRS, auch bekannt als Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE), eingeführt. Dafür wurde der GPRS-Standard um eine neue Modulationsart erweitert, wodurch nochmals wesentlich höhere Datenraten bei der Übertragung erzielt werden konnten.

Datenraten

Mobilfunkstandard	Datenrate
GSM	14,4 kBit/s
GPRS	170 kBit/s
EDGE	270 kBit/s

Tabelle 4: Die Datenraten des 2G-Mobilfunkstandards [31, S. 468].

Die Tabelle 4 zeigt die nach Sauter theoretisch maximal erreichbaren Übertragungsgeschwindigkeiten der erläuterten Mobilfunkstandards. Es werden für diese älteren Technologien in der heutigen Netzinfrastruktur nur noch begrenzte Spektren bereitgestellt. Deshalb fallen die in der Praxis tatsächlich erreichbaren Datenraten deutlich geringer aus als die hier aufgeführten theoretischen Maximalwerte [31, S. 468].

Priorisierungsmechanismen in GSM

Obwohl GSM auf einem leitungsvermittelnden Ansatz mit konstanten Bitraten basiert, wurden im Standard zwei Priorisierungsmechanismen implementiert. Diese bilden technologische Ansätze für spätere Architekturen des Quality of Service. Das Access Control regelt die grundsätzliche Zugangsberechtigung zum Netz, während der enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption Service (eMLPP) die Bevorzugung bestimmter Verbindungen steuert.

Access Control teilt Endgeräte anhand der SIM-Karte in 15 Zugriffsklassen ein, um bei Netzüberlastungen oder in Notlagen die Verbindung bestimmter Nutzergruppen zu sperren. Herkömmlichen Nutzern werden die Klassen 0 bis 9 zufällig zugewiesen. Die Klassen 10 bis 15 sind exklusiv für priorisierte Anwender wie Rettungsdienste, Sicherheitsbehörden und öffentliche Versorgungsunternehmen reserviert [33, S. 18].

Das eMLPP ist ein siebenstufiges Priorisierungssystem für Verbindungen. Das zugehörige Nutzerprofil wird im Home Location Register (HLR) gespeichert und erfordert für die Anwendung stets eine Autorisierung durch das zuständige Visitor Location Register (VLR). Einem Teilnehmer wird dabei eine Vorrangigkeit (Precedence) zugewiesen, die auch niedriger priorisierten Verkehr aktiv aus dem Netz zu verdrängen (Pre-emption) darf [34, S. 6–8].

3.3.3 Long Term Evolution LTE

Der Standard Long Term Evolution (LTE) wurde im Jahr 2008 durch das 3rd Generation Partnership Project (3GPP) veröffentlicht, nachdem die Entwicklungspotenziale des Vorgängerstandards UMTS (3G) größtenteils ausgeschöpft waren. Die Priorität lag bei der Neuentwicklung auf der Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeiten. So wurden bereits in der ersten Veröffentlichung theoretische Datenraten von bis zu 300 Mbit/s im Download und 75 Mbit/s im Upload definiert. In der späteren Erweiterung „LTE-Advanced“ wurden die Maximalwerte auf 1000 Mbit/s im Download und 500 Mbit/s im Upload erhöht.

Neben der reinen Kapazitätssteigerung lag ein weiterer Fokus auf der Implementierung einer vollständig paketvermittelten Sprachübertragung (Voice over LTE), die eine deutlich verbesserte Sprachqualität gewährleistet. Das System wurde auch dahingehend erweitert, um eine sehr hohe Dichte an Geräten pro Funkzelle effizienter zu verwalten, die typischerweise nur geringe Datenmengen übertragen. Dies in Kombination mit einer hohen Signalreichweite und inzwischen geringen Kosten für die entsprechenden Funkmodule bildet LTE somit eine relevante Option für das zu entwickelnde System [8, S. 695–697].

Die LTE-Architektur

Die LTE-Architektur wird im Gegensatz zum GSM-Kernnetz dezentral organisiert. Eine Sendestation wird in LTE als evolved Node B (eNodeB) definiert. Er besteht aus der digitalen Signalverarbeitung (BBU), dem Radiomodul (RRU) und den Antennen. Im Gegensatz zur früheren GSM-Sendestation übernimmt der eNodeB selbstständig Aufgaben wie die Benutzerverwaltung, die Ressourcenverteilung auf der Luftschnittstelle und das Mobilitätsmanagement. Er verwaltet die Radio Access Bearer (RAB), welche die QoS-Attribute einer Verbindung definiert, wie unter anderem die maximal zulässige Verzögerung und die Übertragungsgeschwindigkeit. Ebenfalls teilt der eNodeB die Funkressourcen basierend auf dem QoS-Nutzerprofil zu [31, S. 1–17].

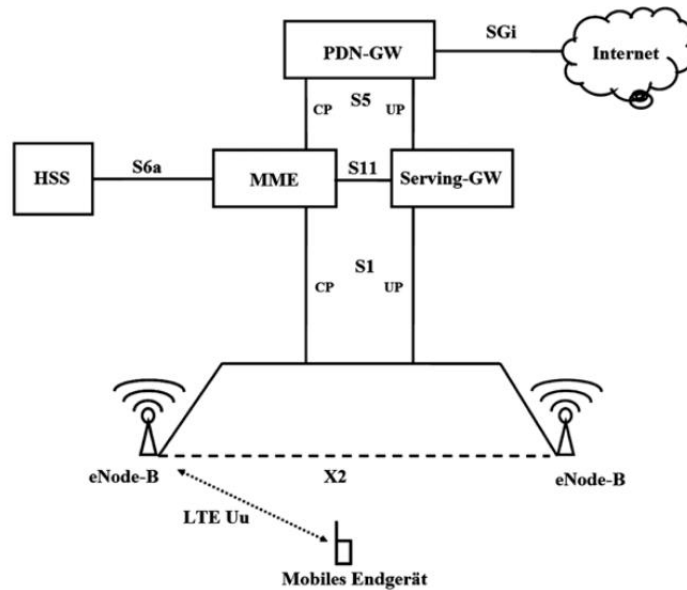


Abbildung 16: LTE-Gesamtsystem im Überblick [31, S. 3] Fig. 1.1.

Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, besteht mit dem X2-Interface eine Direktverbindung zwischen den eNodeBs. Das X2-Interface ermöglicht schnelle Handover ohne Umweg über das Kernnetz, was Paketverluste und Verzögerungen beim Zellenwechsel minimiert.

Auf der S1-Schnittstelle werden zwei Tunnel betrieben. Zum einen der User Plane (UP), der die IP-Pakete der Nutzer transportiert, und zum anderen der Control Plane (CP), der für Flusskontrolle und Steuernachrichten zuständig ist.

Die UP-Tunnel sind an das Serving Gateway (S-GW) angebunden, das die S1-Schnittstelle zum Funknetz und die S5-Schnittstelle zum restlichen Kernnetz trennt. Im Falle eines Handovers muss nur der Endpunkt eines UP-Tunnels zum eNodeB angepasst werden. Die Erstellung neuer UP-Tunnel wird von der Mobility Management Entity (MME) über die S11-Schnittstelle gesteuert.

Der CP-Tunnel ist an die MME angebunden. Diese übernimmt Aufgaben wie die Authentifizierung von Endgeräten, die Koordination des Handovers (wenn keine direkte X2-Schnittstelle vorhanden ist) und den Aufbau von Datenverbindungen.

Das Packet Data Network Gateway (PDN-Gateway) bildet die Schnittstelle zwischen dem LTE-Kernnetz und externen Datennetzen wie dem WAN und ist für die Vergabe von IP-Adressen der mobilen Endgeräte verantwortlich. Meldet ein eNodeB die Registrierung eines neuen Endgerätes der MME, fordert diese nach der Authentifizierung bei dem PDN-GW mindestens zwei IP-Adressen an. Eine Adresse wird für den Datenverkehr benutzt, die zweite dient exklusiv den Sprachanrufen. Durch den bereits in Kapitel 3.2.3 erwähnten Mangel an IP-Adressen kommt hier Network Address Translation (NAT) zum Einsatz.

Der Home Subscriber Service (HSS) ist die zentrale Nutzerdatenbank des Mobilfunknetzes. Wie das Home Location Register in GSM identifiziert er Teilnehmer weltweit über die IMSI. Er enthält alle relevanten Nutzerinformationen wie die maximalen Datenraten des Tarifs, welcher Mobilfunkstandard verwendet werden darf und welches QCI-Profil in den Verbindungen angewandt wird. Er fungiert zudem als Authentication Center (AuC), das geheime Schlüssel verwaltet und temporäre Schlüssel für die Tunnel generiert. Über die S6a-Schnittstelle kommuniziert er mit der MME [31, S. 3–14].

Datenraten

LTE-Kategorie	Download Max. Mbit/s	Upload Max. Mbit/s	MIMO bis	QAM Down/Up
CAT 1	10	1	Single	64/16
CAT 4	150	50	2x2	64/16
CAT 10 (Advanced)	450	100	4x4	256/16
CAT 20	2000	316	8x8	256/256

Tabelle 5: Vier exemplarische LTE-Gerätekatégorien [35].

Die Tabelle 5 zeigt vier Beispiele für die sogenannten Gerätekatégorien (CAT) innerhalb des LTE-Standards. Diese Katégorien wurden definiert, um die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Endgeräte wie Router, Smartphones oder Module netzseitig einzuordnen. Eine solche Katégorie legt die maximal erreichbaren Datenraten für den Download und Upload fest. Zudem definieren die Klassen die jeweils verwendete Modulationsart sowie die Anzahl der unterstützten Antennen im Rahmen der MIMO-Technologie. Dieses Konzept wird im nachfolgenden Kapitel zu 5G detaillierter behandelt. Die höchsten LTE-Katégorien zielten technologisch bereits auf den fließenden Übergang zum neueren 5G-Standard ab [35].

Der Ausbau des 4G-Netzes gilt in Deutschland mittlerweile als abgeschlossen. Die etablierten Netzbetreiber Telekom, Telefónica (O2) und Vodafone weisen jeweils eine Netzabdeckung von mindestens 99 Prozent auf. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Netzbetreiber bereits seit dem Jahr 2019 primär auf den flächendeckenden Ausbau des aktuellen 5G-Netzes [36].

3.3.4 5G New Radio (NR)

Im Jahr 2018 veröffentlichte die 3GPP mit dem Release 15 die erste Spezifikation des neuen 5G-Mobilfunkstandards. Während die Entwicklung des Vorgängers LTE noch primär auf die mobile Breitbandkommunikation für Endnutzer ausgerichtet war, orientierte sich die Konzeption von 5G an konkreten Anwendungsfällen. Dazu zählen beispielsweise das autonome Fahren oder Echtzeit-Video-Broadcasting. Dafür lag ein starker Fokus auf der Verringerung von Latenzzeiten und der Fähigkeit QoS-Anforderungen für bestimmte Dienstleistungen zu garantieren. Erreicht werden diese Garantien durch technologische Neuerungen wie das Konzept des Network Slicing in der Netzarchitektur und eine flexiblere Luftschnittstelle. Diese Optimierung von Latenz und QoS-Mechanismen macht den 5G-Standard zu einem relevanten Untersuchungsgegenstand für diese Arbeit [37, S. 105–113].

Ziele und Use Cases

An der Zielsetzung und Formulierung der Anforderungen sind verschiedene Organisationen beteiligt, wie die Next Generation Mobile Networks (NGMN Alliance) und die International Telecommunication Union (ITU). Basierend auf deren Anforderungen wird deutlich, dass ein 5G-Netz unterschiedlichste Dienste mit stark variierenden Bitraten und Endgerätezahlen an verschiedensten Orten bereitstellen muss. Da diese Anforderungen zum Teil divergieren, muss das Netzwerk eine hohe Flexibilität und Skalierbarkeit aufweisen. Die ITU hat all diese Anforderungen in die folgenden drei Hauptanwendungsfälle kategorisiert:

Enhanced Mobile Broadband (eMBB)

Dieser Anwendungsfall bündelt die Anforderungen an sehr hohe Datenraten mit hoher Dichte an Nutzern. Diese sollen zum einen durch mobile Hotspots mit Datenraten von bis zu 20 Gbit/s im Download und 10 Gbit/s im Upload stationär verfügbar sein. Andererseits soll eine kontinuierliche Konnektivität in einem ausgedehnten Bereich gewährleistet werden, auch wenn der Nutzer mobil ist [8, S. 717], [37, S. 110]. Dies betrifft überwiegend Multimediaanwendungen wie Streaming in hoher Qualität oder Cloud-Gaming.

Ultra-Reliable and Low Latency Communications (URLLC)

Hierunter fallen Dienste, die hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit stellen. So muss das Netz eine Latenzzeit von lediglich 1 ms gewährleisten. Zudem wird für bestimmte kritische Anwendungsfälle eine hohe Netzverfügbarkeit von bis zu 99,999 % verlangt. Dies betrifft beispielsweise Anwendungen wie autonomes Fahren

oder Fern-Operationen in der Medizin, die auf eine niedrige Latenz und flächendeckenden Service angewiesen sind [8, S. 717], [37, S. 110].

Massive Machine Type Communications (mMTC)

Dieser Bereich adressiert die massenhafte Vernetzung von Geräten und Sensoren. Während hier die Datenrate und Latenz eine untergeordnete Rolle spielen, stehen Effizienz und Gerätedichte im Vordergrund. Die Technik soll kostengünstig sein und über eine möglichst lange Akkulaufzeit verfügen können [37, S. 110]. Beispiele hierfür sind smarte Messsysteme für Energieversorger wie Strom-, Wasser- und Gaszähler. Die Herausforderung hierbei liegt in dem Handling von einer großen Menge an Geräten, die viele kleinere Datenpakete anliefern.

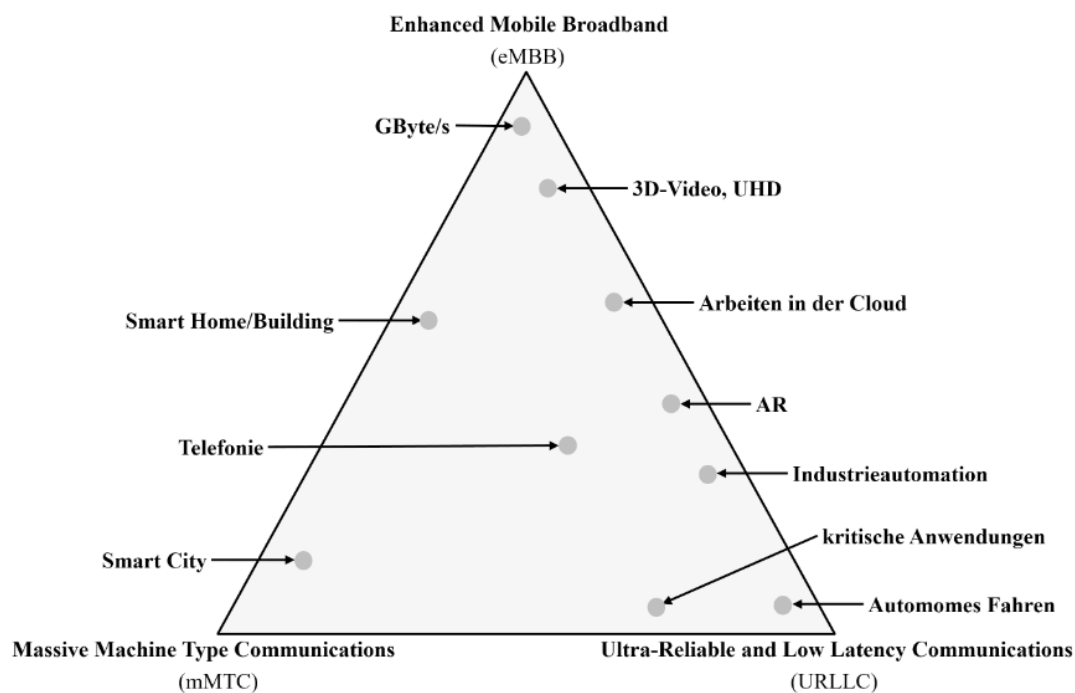


Abbildung 17: Die Anwendungsszenarien der ITU mit konkreten Beispielen [37, S. 111] Fig. 4.1.

So zeigt die Abbildung der ITU, dass für jeden Anwendungsfall gewisse Anforderungen in bestimmter Ausprägung erfüllt werden müssen. Beispielsweise muss in einer Augmented-Reality-Anwendung (AR) der Content zur Bewegung passen und ist somit auf eine niedrige Latenz angewiesen. Gleichzeitig wird er durch das Laden von Bildmaterial viel Bandbreite beanspruchen.

Da für das zu entwickelnde System die Ansprüche an die Datenrate gering sind und die Latenz sehr niedrig sein soll, lässt sich dieser Use Case eher dem URLLC-Hauptanwendungsfall zuweisen.

Zwei weitere Kernfunktionen sind das Network Slicing und Campus Netze, welche für Geschäftskunden mit Ansprüchen an eine garantierte Verfügbarkeit des Netzes entwickelt

Signalisierungsnachrichten an die AMF, welche die Verbindungs- und Mobilitätsaufgaben übernimmt und sitzungsbezogene Anfragen an die SMF weiterleitet. Auch die bisherige Teilnehmerdatenbank Home Subscriber Service (HSS) wurde in drei Funktionen gegliedert: die Authentication Server Function (AUSF), das Universal Data Management (UDM) für den Informationszugang und das Unified Data Repository (UDR) für die Ablage der eigentlichen Kundendaten.

Das Gateway zum WAN bilden in LTE das Serving-Gateway und PDN-Gateway, welche unter 5G zu der User Plane Function (UPF) zusammengefasst werden. Dadurch wird auf dem Weg vom mobilen Endgerät zum WAN eine Instanz gegenüber dem LTE-Kernnetz eingespart, wie in der Abbildung 18 zu sehen ist. Zusätzlich kommt die Policy Control Function (PCF) zum Einsatz, welche die QoS-Anforderungen in der UPF umsetzt [31, S. 177–178].

Die Neuerungen in der 5G-Luftschnittstelle

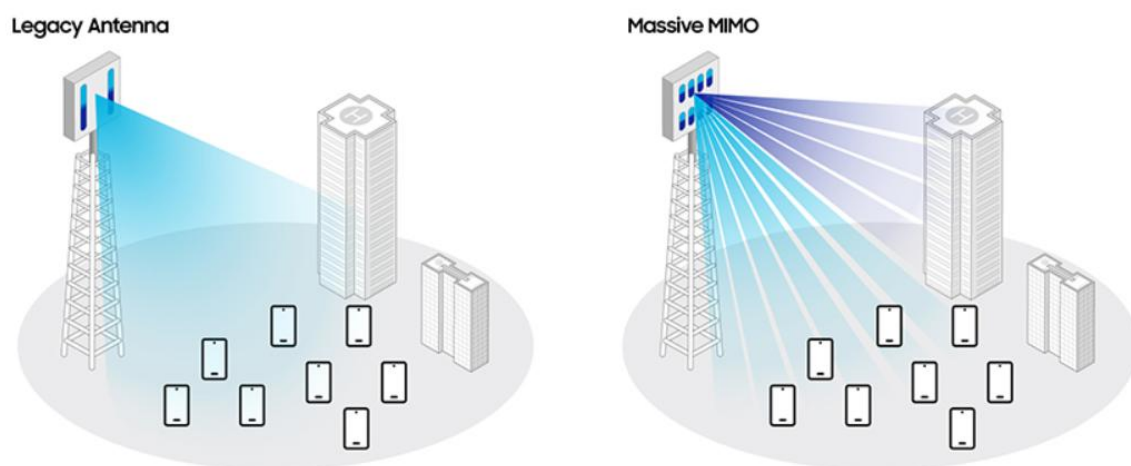


Abbildung 19: Beamforming durch Massive MIMO [38].

Ein Merkmal der neuen Luftschnittstelle ist der Einsatz von Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO), einem Mehrantennenverfahren zur Steigerung der Kapazität und Reichweite. Während bei LTE maximal acht Antennen pro Panel zum Einsatz kommen, nutzt 5G "Massive MIMO" 64 oder perspektivisch mehr als 1024 Antennen innerhalb eines Panels. Durch die kurzen Wellenlängen der hohen 5G-Frequenzen wird eine kompakte Bauweise der Antennenpaneele möglich. Durch die Überlagerung der einzelnen Antennensignale entsteht das sogenannte Beamforming. Wie in der Abbildung 19 zu sehen ist, werden Sendekerulen exakt auf den Nutzer ausgerichtet, wodurch Störungen minimiert und ungenutzte Bereiche vernachlässigt werden können. Der dadurch entstehende hohe Antennengewinn gleicht die Ausbreitungsverluste der hohen Frequenzen aus. Verwaltet werden diese Strahlen durch spezielle Mechanismen wie Beam Switching, eine Art

Handover, wenn das Endgerät zwischen zwei Beams wechselt. Und Beam Recovery, wenn der Nutzer nach kurzzeitiger physischer Abschattung wieder einen Beam betritt [8, S. 720–722].

Network Slicing und Campusnetze

Während bei LTE viele Prozesse im Kernnetz an fest verbaute Hardware-Komponenten gebunden waren, ermöglicht die 5G-Architektur durch einen softwarebasierten Ansatz das Network Slicing.

Die Grundidee dabei ist, Teilbereiche (Slices) von der Gesamtkapazität des Netzes virtuell abzutrennen und separat zu behandeln. Durch diese Isolation lassen sich QoS-Anforderungen garantieren und Latenz für anspruchsvolle Anwendungen gezielt minimieren.

Praktisch wird das Slicing von den zuvor erwähnten Instanzen Access Management Function (AMF) und Session Management Function (SMF) umgesetzt. Beim Verbindungsaufbau teilt das Endgerät der AMF mit, welchen spezifischen Slice es benötigt. Die AMF kontrolliert zunächst, ob das Gerät zur Nutzung des angefragten Slices berechtigt ist, und weist dann mithilfe der SMF dem Endgerät den entsprechenden Slice zu. Ein einzelnes Endgerät kann bis zu acht Slices parallel belegen, innerhalb eines Slices kann zudem Datenverkehr nach QoS-Vorgaben priorisiert werden [31, S. 204–206].

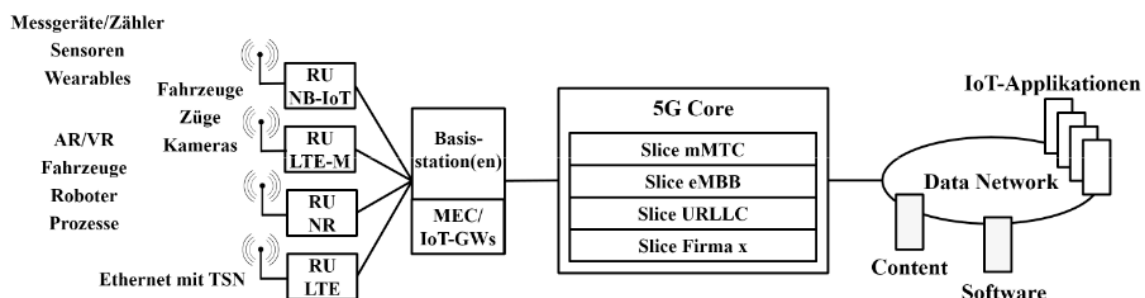


Abbildung 20: Die Umsetzung von Network Slicing im Kernnetz [37, S. 236] Fig. 9.18.

Wenn sich ein Unternehmen (Campus) sich für die Anbindung seiner Geräte einen exklusiven Slice sichert, lässt sich das als Campusnetz-Anwendung oder Non-Public Network (NPN) bezeichnen. Campusnetze dienen im Gegensatz zu den öffentlichen Netzen der rein lokalen Vernetzung, wie z.B. in der Industrie oder Logistik. Durch sie können hohe Anforderungen an Latenz und Datensicherheit realisiert werden, wofür in Deutschland exklusive Frequenzen (3,7-3,8 GHz) bereitstehen. Neben dem genannten Slice im öffentlichen 5G-Netz (in diesem Kontext auch als Public Land Mobile Network (PLMN) bezeichnet) gibt es drei weitere Realisierungswege [37, S. 236–238]:

- Eigenständiges NPN: Für hohe Ansprüche an Datenraten, Sicherheit und geringe Latenzzeiten. Neben dem 3,7- 3,8 GHz-Spektrum kann hier auch der Frequenzbereich

24,25 GHz - 27,5 GHz benutzt werden. Es werden eigene gNodeBs betrieben, das Netz muss durch den Campus oder einen Dienstleister unterhalten werden.

- Shared Radio Area Network (RAN): Die gNodeBs werden zwischen öffentlichem Netzbetreiber und NPN geteilt. Das Kernnetz betreibt der Campus selbst. Der Vorteil hierbei ist, dass auf dem Campus zusätzliche Frequenzbänder für die Übertragung zur Verfügung stehen.
- Firmennetz mit Anbindung an PLMN: Hier werden die gNodeBs ebenfalls durch den Campus betrieben, jedoch gibt es eine Anbindung an das PLMN-Kernnetz, was zu mehr Flexibilität führt.

Die Zugänglichkeit von Campusnetzen und Network Slicing ist bisher in der Regel Geschäftskunden vorbehalten. O2, Vodafone und die Telekom bieten hier in den Kundenportalen verschiedene Lösungen. So kann beispielsweise bei der Telekom ein sogenannter Broadcast Slice gebucht werden, welcher für Mobile Journalism und Live-Videoproduktion gedacht ist. Hier werden Datenraten von 8 Mbit/s im Upload und 3Mbit/s im Download außerhalb geschlossener Räumlichkeiten garantiert. Die Abrechnung erfolgt im 15-Minuten-Takt und kostet 50 € zusätzlich zum jeweils gebuchten Business-Datentarif [39].

Datenraten

Die theoretisch erreichbaren Datenraten von 20 Gbit/s im Download und 10 Gbit/s im Upload entsprechen gemäß einer Erhebung von Opensignal aus dem Jahr 2022 in der Praxis noch nicht der Realität. Die folgende Abbildung verdeutlicht jedoch, wie der technologische Wechsel von LTE zu 5G die verfügbare Datenrate vervielfachen kann. Laut dieser Erhebung steht der durchschnittlichen LTE-Downloadrate von 46,3 Mbit/s in Deutschland eine durchschnittliche 5G-Downloadrate von 138,3 Mbit/s gegenüber [40].

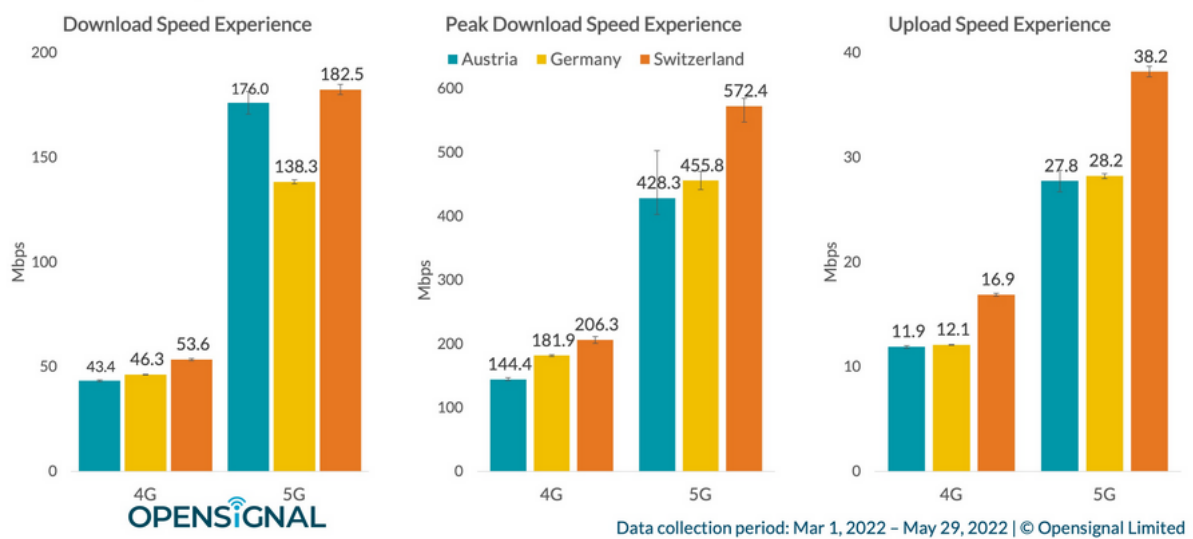


Abbildung 21: Die Download- und Uploadraten in Mbit/s erhoben von Opensignal [40].

Auch die aktuellen Tarifangebote der Netzbetreiber liegen gegenwärtig noch deutlich unter den theoretischen Maximalwerten des 5G-Standards. So gibt die Telekom in ihren gängigen Tarifen maximale Datenraten von 300 Mbit/s im Download sowie 50 Mbit/s im Upload an. Vodafone bietet eine identische Kapazität im Download, stellt den Nutzern jedoch im Upload eine Bandbreite von bis zu 100 Mbit/s zur Verfügung [41], [42].

3.4 Serielle Schnittstellen und Kommunikation

Um eine schnelle Kommunikation zwischen Hardwarebauteilen auf Platineebene zu ermöglichen, wurden in der Elektrotechnik standardisierte Schnittstellen und Protokolle entwickelt. Auch der Prototyp setzt sich aus mehreren Modulen zusammen, die untereinander Daten austauschen. Der detaillierte Aufbau und die Verschaltung der Komponenten wird in der Implementierung behandelt. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Hardware-Schnittstellen erläutert.

3.4.1 Serial Peripheral Interface (SPI)

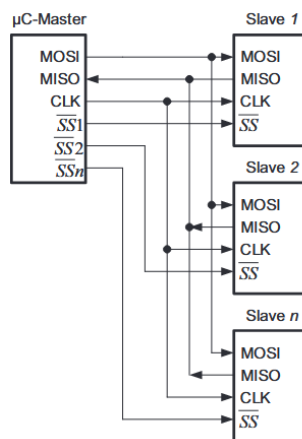


Abbildung 22: Der Aufbau einer SPI-Verbindung [43, S. 221] Fig. 8.2.

Das Serial Peripheral Interface (SPI) ist ein weit verbreitetes Kommunikationsprotokoll für den seriellen Datenaustausch. Im Gegensatz zu UART verfügt SPI über eine Taktleitung. Diese Trennung von Taktsignal und Datenleitung ermöglicht eine hohe Übertragungsrate. Die maximale Taktrate ist dabei von der Taktfrequenz des Master-Controllers abhängig. Sie lässt sich theoretisch mit $f_{OSC}/2$ ermitteln, sodass beispielsweise bei einem Prozessortakt von 10 MHz Datenraten von bis zu 5 Mbit/s erzielt werden können [43, S. 224].

Die Architektur des Protokolls erfolgt nach einem Master-Slave-Prinzip. Ein wesentlicher Vorteil dieses Bussystems liegt darin, dass ein einzelner Master-Controller mehrere SPI-fähige Module über dieselbe Datenschnittstelle abfragen kann. Ein SPI-Bus benötigt dafür vier Anschlusspins:

- SCK (Serial Clock) oder CLK: Die vom Master generierte Taktleitung zur Synchronisation aller Busteilnehmer.
- MOSI (Master Out Slave In): Die Datenleitung für das Senden von Daten vom Master zum adressierten Slave.
- MISO (Master In Slave Out): Die Datenleitung für das Senden von Daten vom adressierten Slave zurück zum Master.

- SS (Slave Select): Die Steuerleitung zur Aktivierung eines Slaves, die in vielen Datenblättern auch als Chip Select (CS) bezeichnet wird. Die Abbildung 22 verdeutlicht, dass seitens des Masters genauso viele SS-Pins verfügbar sein müssen, wie sich Slave-Geräte in der Signalkette befinden.

Damit ein Slave innerhalb dieser Kette aktiv wird und Daten senden oder empfangen kann, muss der Master den zugehörigen SS-Pin auf einen niedrigen Spannungspegel (LOW) schalten. Es darf zu jedem Zeitpunkt immer nur exakt ein Slave aktiv sein. Sobald die Freigabe erfolgt ist, tauschen die Geräte ihre Daten über die MISO- und MOSI-Leitungen aus [43, S. 219–221].

3.4.2 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)

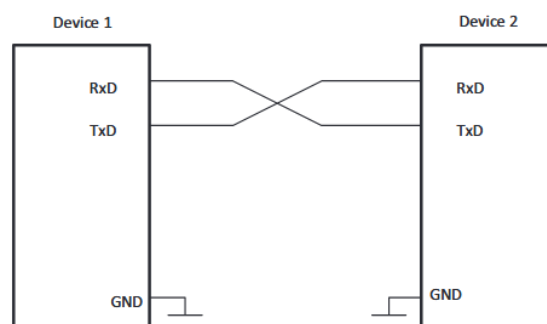


Abbildung 23: Der Aufbau einer UART-Verbindung [43, S. 196] Fig. 7.1.

UART ist ein in der Mikroelektronik weit verbreitetes Kommunikationsprotokoll. Es bildet die Grundlage für diverse weitere serielle Protokolle, wie beispielsweise den RS485-Standard, der dem DMX512-Protokoll zugrunde liegt.

Im Gegensatz zu Bussystemen wie SPI ist eine UART-Schnittstelle für die direkte Verbindung zwischen exakt zwei Geräten konzipiert. Für die Kommunikation werden lediglich zwei Anschlusspins benötigt. Der Anschluss TX (Transmit) dient dem Senden eines ausgehenden Datenstroms, während der Anschluss RX (Receive) für das Auslesen des eingehenden Datenstroms zuständig ist. Wie die Abbildung 23 zeigt, müssen diese Signalleitungen zwischen den Kommunikationspartnern überkreuzt werden. Der TX-Pin des ersten Geräts wird dementsprechend mit dem RX-Pin des zweiten Geräts verbunden und umgekehrt.

Weil Sender und Empfänger sich nicht über eine Taktleitung synchronisieren, wird diese Schnittstelle als asynchron bezeichnet. Deshalb müssen stattdessen beide Geräte softwareseitig auf eine identische Übertragungsgeschwindigkeit konfiguriert werden. Diese Geschwindigkeit wird als Baudrate bezeichnet und definiert die Menge der übertragenen Datenbits pro Sekunde [43, S. 195–198].

Der Datenaustausch erfolgt Frame-basiert und wird häufig in der Praxis anhand des 8N2-Formates übertragen. Bei diesem Aufbau setzt sich ein einzelner Datenframe aus insgesamt elf Bits zusammen. Der Transfer wird durch ein Startbit eingeleitet, woraufhin die acht eigentlichen Datenbits folgen. Abgeschlossen wird der Frame durch zwei aufeinanderfolgende Stoppbits. Der Buchstabe N in dieser Bezeichnung verdeutlicht, dass auf ein Paritätsbit verzichtet wird [43, S. 219].

3.4.3 Haynes-AT-Befehlssatz

Der AT-Befehlssatz wurde ursprünglich von dem Unternehmen Hayes entwickelt und ab dem Jahr 1981 in deren Produkten implementiert. Er stellt eine Methode zur Konfiguration und Steuerung von Modems für den Netzzugang dar [44]. Die ITU und das 3GPP haben die Kommandos teilweise standardisiert und erweitert, weshalb sie heute noch weit verbreitet sind.

In dem zu entwickelnden Hardwareprototyp erfolgt die Übertragung der Befehle zwischen dem Mikrocontroller und dem Mobilfunkmodem über die zuvor erläuterte UART-Schnittstelle. Die Kommunikation hat nach einem festen Schema zu erfolgen. Jeder Befehlsaufruf muss mit dem Präfix „AT“ (abgeleitet von Attention) eingeleitet werden. Für eine konkrete Anweisung müssen ein Plus und ein gültiger Befehl in spitzen Klammern folgen: *AT+<Befehl>*

Um den Befehl an das Modul zu übergeben und dessen Ausführung zu initiieren, wird die Zeichenkette mit dem Steuerzeichen (Enter oder /n) abgeschlossen.

Ein Programm muss auf jede gesendete Anweisung eine Antwort des Modems abwarten, welche bei Erfolg mit „OK“ bestätigt oder bei Fehlern mit „ERROR“ widerrufen wird. Erst wenn das Programm einen Antwortcode erhalten hat, darf der nächste Befehl gesendet werden. Mit dieser Vorgehensweise ist sichergestellt, dass das Modem alle Anweisungen zuverlässig verarbeitet [45, S. 32]. Zur Erläuterung listet die nachfolgende Tabelle drei exemplarische AT-Befehle aus dem Datenblatt des in dieser Arbeit verwendeten LTE-Modems auf:

Anfrage	AT-Befehl	Erwartete Antwort
Signalstärke (RSSI), Bitfehlerrate (BER)	AT+CSQ	+CSQ: <rssi>, <ber> OK (Oder ERROR)
SIM-Karte per Pin entsperren	AT+CPIN=<pin>	OK (Oder ERROR)
Telefongespräch beenden	AT+CHUP	OK VOICE CALL: END: <time>

Tabelle 6: Drei exemplarische AT-Kommandos für Funktionen des LTE-Modems [46, S. 57, 142, 163]

4. Systementwurf

Das folgende Kapitel befasst sich mit dem Entwurf des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Anforderungen aus dem Abschnitt 2.3. Zu Beginn wird die Systemarchitektur definiert. Darauf aufbauend werden die nötigen Kommunikationsabläufe erläutert und die Hardwareauswahl für den Prototypen vorgestellt und diskutiert.

4.1 Grundlegende Architektur

Entsprechend den definierten Systemanforderungen gliedert sich die Architektur für die Übertragung der Art-Net-Pakete in drei Instanzen. So setzt sich das Gesamtsystem aus einer Sendeinstanz, einer zentralen Vermittlungsinstanz und der mobilen Empfangsinstanz zusammen.

Sendeinstanz

Die Sendeinstanz befindet sich innerhalb eines lokalen Netzwerks. Sie besteht aus einer PC-Software, welche ein Art-Net-Protokoll generieren kann. Diese Instanz muss über einen Patch des Lichtsystems verfügen, das am Zielort angesteuert werden soll. Um die Steuerdaten senden zu können, muss der Sendeinstanz die öffentliche IP-Adresse der Vermittlungsinstanz bekannt sein.

Vermittlungsinstanz

Im Zentrum der Architektur steht die Vermittlungsinstanz, welche oftmals auch als Relay-Server bezeichnet wird [47]. Ihre primäre Aufgabe besteht darin, die eingehenden Lichtsteuerdaten der Sendeinstanz anzunehmen und möglichst verzögerungsfrei an den mobilen Prototypen weiterzuleiten. Der Einsatz eines solchen Servers ist aus zwei Gründen wichtig für das Systemdesign. Einerseits stellt er den einzigen Ankerpunkt mit einer öffentlichen IP-Adresse im gesamten System dar. Da sich sowohl der Sender als auch der Empfänger in separaten Netzwerken befinden, ist der Server für die Überbrückung von NAT unabdingbar. Andererseits ermöglicht er eine unabhängige Verwaltung und die zukünftige Skalierbarkeit des Systems. So könnten mehrere eintreffende Art-Net-Signale von verschiedenen Sendern an viele Empfänger verteilt werden.

Empfangsinstanz

Die Empfangsinstanz wird durch den Hardware-Prototypen am Produktionsort repräsentiert. Ihre Funktion besteht darin, die vom Relay-Server weitergeleiteten Art-Net-Pakete über das Mobilfunknetz zu empfangen und in ein DMX512-Signal in das lokal angeschlossene Lichtsystem umzusetzen. Um bei Problemen wie Überlastungen in einzelnen Funkzellen eine Ausfallsicherheit

zu gewährleisten, könnte für diese Instanz idealerweise eine redundante Anbindung über einen sekundären Mobilfunkstandard erfolgen.

4.2 Kommunikationsstrategie

Um den Transfer der Art-Net-Pakete durchzuführen, ist ein fester Ablauf für den Verbindungsaufbau zwischen den Instanzen notwendig. Dieser Prozess ist in der folgenden Abbildung dargestellt und gliedert sich in drei Phasen.

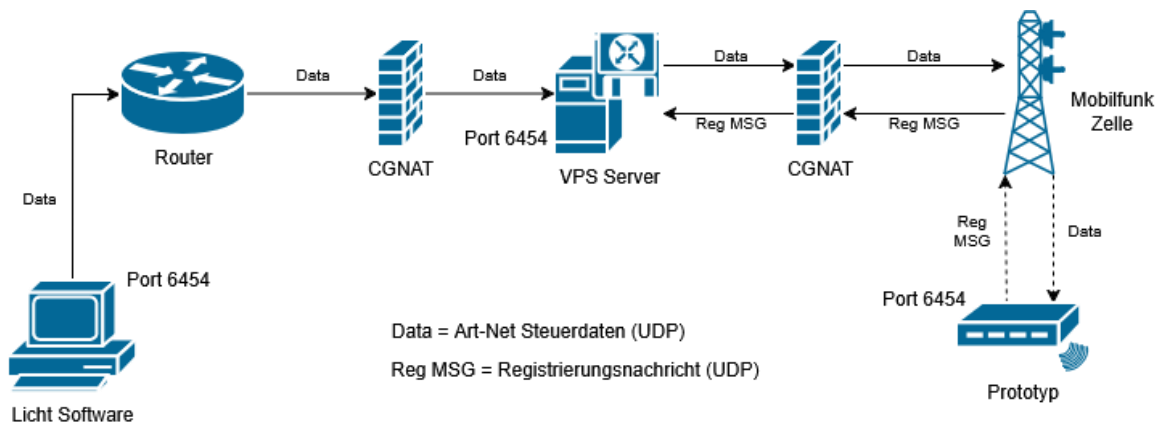


Abbildung 24: Eine Skizzierung der Kommunikationsstrategie, erstellt mit draw.io.

Phase 1: Datenübertragung an den Server

Die Kommunikation beginnt auf Seiten der Sendeinstanz. In der entsprechenden Software wird das Art-Net-Signal direkt an die öffentliche IP-Adresse des Servers auf Port 6454 adressiert.

Phase 2: Registrierung beim Server

Nach der Einwahl in das Mobilfunknetz sendet der Hardware-Prototyp eine UDP-Registrierungsnachricht an die bekannte öffentliche IP-Adresse des Relay-Servers. Durch dieses Paket wird im Router des Mobilfunkanbieters temporär ein Rückkanal in der NAT-Tabelle geöffnet. Der Server erwartet an dem Art-Net-Port 6454 diese Registrierungsnachricht. Bei der Ankunft speichert das Programm des Servers daraufhin die zugewiesene öffentliche Quell-IP-Adresse und den Quell-Port des Mobilfunknetzes aus dem IP-Header. Diese beiden Parameter werden serverseitig als neue Zieladresse für das Routing der Lichtsteuerdaten gespeichert. Um zu verhindern, dass der Provider den geöffneten NAT-Port wegen Inaktivität schließt, sendet der Hardware-Prototyp in einem festgelegten Zeitintervall kontinuierlich diese Registrierungsnachrichten an den Server.

Phase 3: Signalumsetzung und Ausgabe

Wenn die Art-Net-Pakete am Server vorliegen und die Registrierung erfolgreich war, leitet er diese weiter. Dafür speichert er kurz die eintreffenden UDP-Pakete zwischen, setzt die in Phase 2 gespeicherte IP-Adresse und den Port des Hardware-Prototyps als neues Ziel ein und sendet sie zum Hardware-Prototypen.

Für die direkte Ausgabe als DMX512-Signal liest die Empfangsinstanz die reinen Kanalwerte des Art-Net-Frames aus. Diese Werte werden anschließend, nach der in Kapitel 3.1.1 erläuterten Protokollform, über die DMX-Schnittstelle ausgegeben.

Soll das System als Gateway für ein weiteres Endgerät dienen, wird dem empfangenen Art-Net-Frame eine neue lokale Ziel-IP-Adresse zugewiesen. Über den Ethernet-Anschluss könnte so beispielsweise eine Art-Net-DMX-Node mit mehreren Ports die Steuerdaten auf ein Lichtsystem umsetzen.

4.3 Messungen für die Dimensionierung des Systems

Um die Netzwerkanforderungen des zu entwickelnden Prototyps zu bestimmen, wurde im Vorfeld die Datenrate des Art-Net-Protokolls messtechnisch erfasst. Hierfür kommt die Software DMX-Workshop des Anbieters Singularity zum Einsatz. Die Datenübertragung zwischen zwei lokalen Rechnern wurde mithilfe des Netzwerkanalysetools Wireshark untersucht. Die Messung ergab eine konstante Datenrate von 137 kbit/s für die Übertragung eines einzelnen DMX-Universums mit 33 Frames pro Sekunde. Für den parallelen Betrieb von zwei Universen verdoppelt sich dieser Wert entsprechend auf 274 kbit/s. Diese Messwerte definieren die Mindestbandbreite für die drahtlose Übertragungsstrecke.

Basierend auf der ermittelten Datenrate erfolgt die Auswahl eines geeigneten Mobilfunkstandards. Um eine effiziente Lösung zu finden, werden die verfügbaren Datenraten der Standards zunächst von unten nach oben betrachtet. Wie bereits in Kapitel 3.2.3 erläutert, bietet der 2G-Standard EDGE theoretische Maximalraten von bis zu 270 kbit/s. Dieser Wert liegt bereits unterhalb der erforderlichen Bandbreite für zwei Universen. Da sich dieser Standard zudem im Rückbau befindet, stehen die theoretischen Maximalwerte in der Praxis oftmals nicht mehr zur Verfügung.

Um dennoch zu überprüfen, ob sich das EDGE-Netzwerk zumindest als Redundanz-Option für die Übertragung eines einzelnen Universums eignet, wurden Ping-Messungen durchgeführt. Zur methodischen Einordnung ist hierbei anzumerken, dass Pings die Round-Trip Time (RTT) abbilden

und nicht direkt der Latenz der späteren UDP-Datenpakete entsprechen. Für die Einschätzung der Netzwerkleistung stellt dieses Verfahren jedoch einen guten Indikator dar. Die Tests fanden an drei unterschiedlichen Standorten unter Verwendung eines Samsung Galaxy A3 statt. An jedem Standort wurden vier Messungen mit jeweils den Durchschnittswerten aus 16 Pings aufgezeichnet.

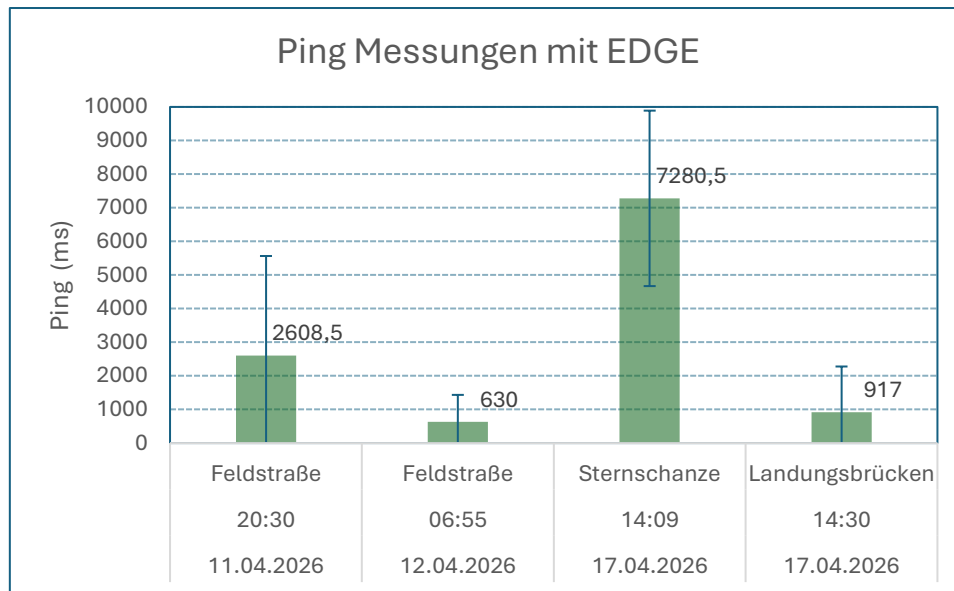


Abbildung 25: Die Dauer des Pings an vier Messpositionen mit EDGE.

Die in dem Diagramm (Abbildung 25) dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass die RTT-Zeiten unter EDGE einer extremen Varianz unterliegen. Selbst die gemessenen Minimalwerte von rund 630 Millisekunden sind für diese Anwendung nicht brauchbar. Folglich scheidet EDGE als Übertragungsweg für dieses System vollständig aus.

In den technischen Grundlagen über Mobilfunk (Kapitel 3.3) wurde bereits erläutert, dass das 3G-Netz in Deutschland abgeschaltet wurde. Nun ist ausgehend von EDGE der LTE-CAT-0-Standard die nächste Option. Hierfür finden sich allerdings kaum verwendbare Module für die Hardware-Entwicklung. Der darauffolgende LTE-CAT-1 -Standard bietet Datenraten von bis zu 10 Mbit/s im Download, womit die ermittelten Systemanforderungen ausreichende Kapazitätsreserven haben (siehe Tabelle 5 in Kapitel 3.3.3). Zusätzlich macht die Verfügbarkeit von günstigen Modulen für die Hardware-Entwicklung diesen Standard zu einer guten Option für dieses System.

4.4 Auswahl der Komponenten

Das folgende Kapitel erläutert die Auswahl der eingesetzten Hardwarekomponenten und Module. Diese Auswahl lässt sich aus den funktionalen Systemanforderungen in Kapitel 2.3.1 ableiten, da jedes der folgenden Module im Grunde eine Anforderung an das System umsetzt. Die angegebenen Preise beziehen sich auf den Stand April 2026.

4.4.1 Mikrocontroller

Der Mikrocontroller bildet die zentrale Recheneinheit des Prototyps, auf welcher die Software ausgeführt wird, die alle Module verbindet. Die Wahl fällt hierbei auf den ESP32, weil im Rahmen vergangener Projekte mit dieser Plattform gute Erfahrungen gesammelt wurden. Zudem ist er gut dokumentiert und wird durch eine große Online-Community unterstützt. Er eignet sich für hardwarenahe Anwendungen und ist mit einer Leistungsaufnahme von 80 mA für den mobilen Einsatz gut geeignet. Obwohl der ESP32 über keine native Ethernet-Schnittstelle verfügt, lässt sich diese über den SPI-Bus realisieren. Mit drei UART-Schnittstellen bietet er zudem genug Möglichkeiten für die parallele Kommunikation mit dem Mobilfunkmodem, DMX-Ausgabe und in Zukunft einem weiteren Modem für Redundanzzwecke. Der ESP32 als DevKitC V4 kostet 13,99 Euro, kann aber auch günstiger erworben werden [48] , [49].

4.4.2 Mobilfunkmodul

Für die Anbindung an das Mobilfunknetz wird das Modul Waveshare A7670E Cat-1 eingesetzt. Die Entscheidung für den LTE-CAT-1 begründet sich durch die in Kapitel 4.3 ermittelte Mindestdatenrate von 274 kbit/s, die von diesem Modul zuverlässig bereitgestellt wird. Ein weiterer Entscheidungsfaktor ist die Wirtschaftlichkeit. Mit einem Anschaffungspreis von 25,73 € ist das Modul im Vergleich zu aktuellen 5G-Lösungen, welche durchschnittlich bei über 200 Euro liegen, deutlich preiswerter. Die Ansteuerung erfolgt über die UART-Schnittstelle mittels des in Kapitel 3.4.3 erläuterten AT-Befehlssatzes [50].

4.4.3 Ethernet- und RS485-Schnittstellen

Für die Anbindung an ein lokales Netzwerk wird das Ethernet-Modul W5500 eingesetzt. Dieses Modul wird über den SPI-Bus an den ESP32 angebunden und unterstützt bis zu acht Socket-Verbindungen. Ein Vorteil dieses Moduls ist, dass es von vielen Software-Bibliotheken unterstützt wird und somit eine aufwändige Konfiguration entfällt. Der Stückpreis pro Modul liegt bei 9,99 € [51].

Die Ausgabe des DMX512-Signals wird über ein MAX485-Modul realisiert. Es bringt das UART-Signal des ESP32 in eine symmetrische Signalform. Dieses Modul ist die günstigste Komponente mit einem Preis von 1,95 € [52].

4.5 Kosten des Hardware-Prototyps

Die folgende Tabelle listet die Kosten des Hardware-Prototypen auf:

Artikel	Anzahl	Kosten €
ESP32 DevkitC V4	1	13,99
Waveshare A7670E	1	25,73
W5500-Ethernet-Modul	1	9,99
MAX-485-Modul	1	1,95
Sammelposten Zusatzmaterial	1	5,00
Summe :		56,66 €

Tabelle 7: Auflistung der Kosten des Hardware-Prototyps

Bauteile und Verbrauchsmaterialien mit geringem Einzelwert, wie Kabel, Lötzinn, Kondensatoren und die XLR-Buchse, werden zur Übersichtlichkeit zu einem Sammelposten zusammengefasst. Diese Aufstellung beschränkt sich zunächst auf die einmaligen Anschaffungskosten der Hardware. Laufende Betriebskosten für den Relay-Server und den Mobilfunkvertrag sind nicht enthalten und werden im Rahmen der Evaluierung gesondert betrachtet.

5. Implementierung

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der praktischen Implementierung der Hardware und Software des Prototyps sowie der Software des Servers. Zur Visualisierung der Programme werden UML-Aktivitätsdiagramme verwendet.

5.1 Empfänger Hardware-Prototyp

5.1.1 Aufbau der Hardware

Weil sich der Hardware-Prototyp im Wesentlichen aus den zuvor genannten vorgefertigten Modulen zusammensetzt, gestaltet sich die Verschaltung übersichtlich und wird anhand des folgenden Blockschaltbilds dargestellt.

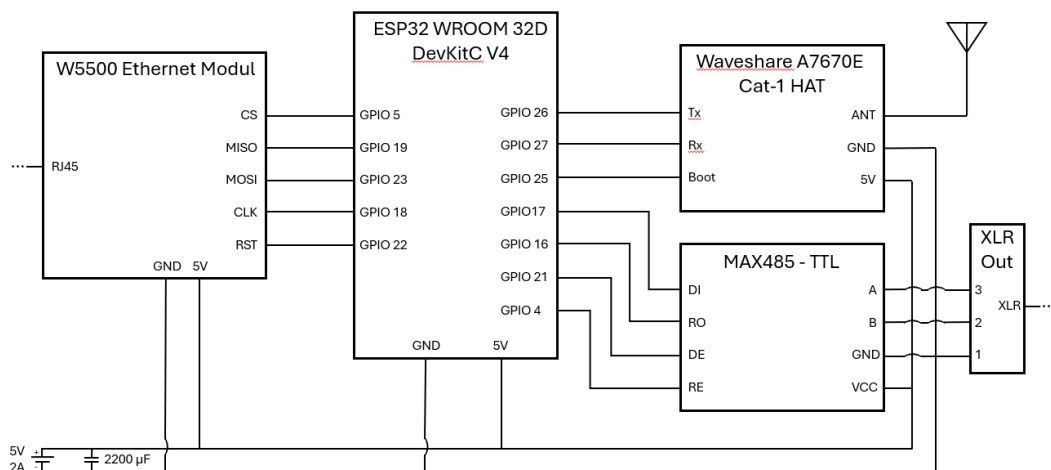


Abbildung 26: Darstellung der Schaltung des Hardware-Prototyps als Blockschaltbild.

Alle verwendeten Module benötigen eine Versorgungsspannung von 5 V und eine gemeinsame Erdung. Hierfür wird ein USB-Kabel verwendet, um die Versorgung über eine Powerbank realisieren zu können. Da das A7670E-LTE-Modul im Betrieb unvorhersehbare kurze Stromspitzen erzeugt, wird ein Kondensator mit einer ausreichenden Kapazität von 2200 µF zur Glättung eingesetzt. Die Notwendigkeit dieses Kondensators fiel nach der ersten Zusammenschaltung aller Module auf einem Breadboard auf. Ohne Kondensator verhielt sich das System instabil und es kam häufig zu Abstürzen.

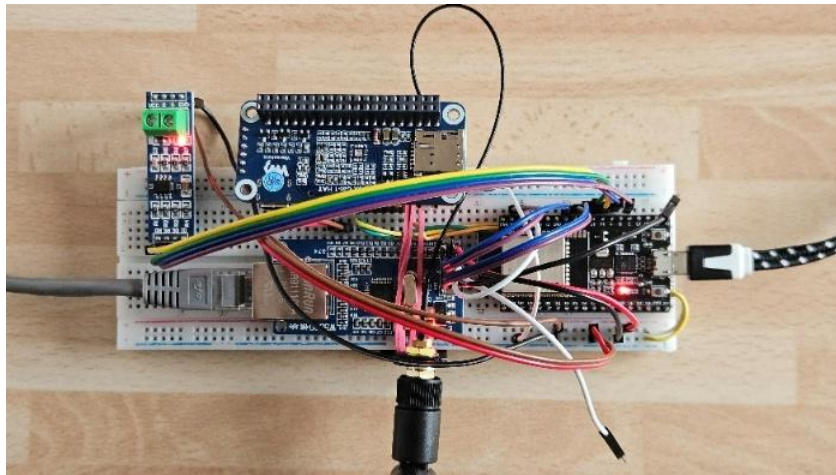


Abbildung 27: Die erste Verschaltung aller Module auf einem Breadboard.

Der Anschluss aller Module an den ESP32 erfolgt über bestimmte GPIO-Pins, welche die jeweilige Daten-Schnittstelle repräsentieren. Die genaue Verschaltung ist der Abbildung 26 zu entnehmen. Das A7670E-Modem belegt den UART-1-Anschluss und das MAX485-Modul nutzt UART2. Wie bereits in Kapitel 4.4.1 erwähnt, verfügt der ESP32 noch über eine dritte UART-Schnittstelle (UART 0), die während der Entwicklung als Debug-Schnittstelle genutzt wurde. Weitere Pins werden zum Booten des Modems und für das Festlegen der Kommunikationsrichtung (Senden oder Empfangen) des MAX485 benötigt. An letzterem Modul ist die weibliche XLR-Buchse angebunden, die der Ausgabe des DMX512-Signals dient. Das W5500-Ethernet-Modul ist an die SPI-Schnittstelle des ESP32 angeschlossen und benötigt zusätzlich noch einen Pin zum Zurücksetzen des Moduls.

Um den Hardware-Prototypen für den Einsatz auf einer Veranstaltung robuster zu bauen, wurden die Module auf einer Lochplatine verlötet. Mit der Modellierungssoftware Blender wurde ein Gehäuse entworfen und 3D-Gedruckt, über das alle Anschlüsse und der SIM-Kartenslot von außen erreichbar sind.

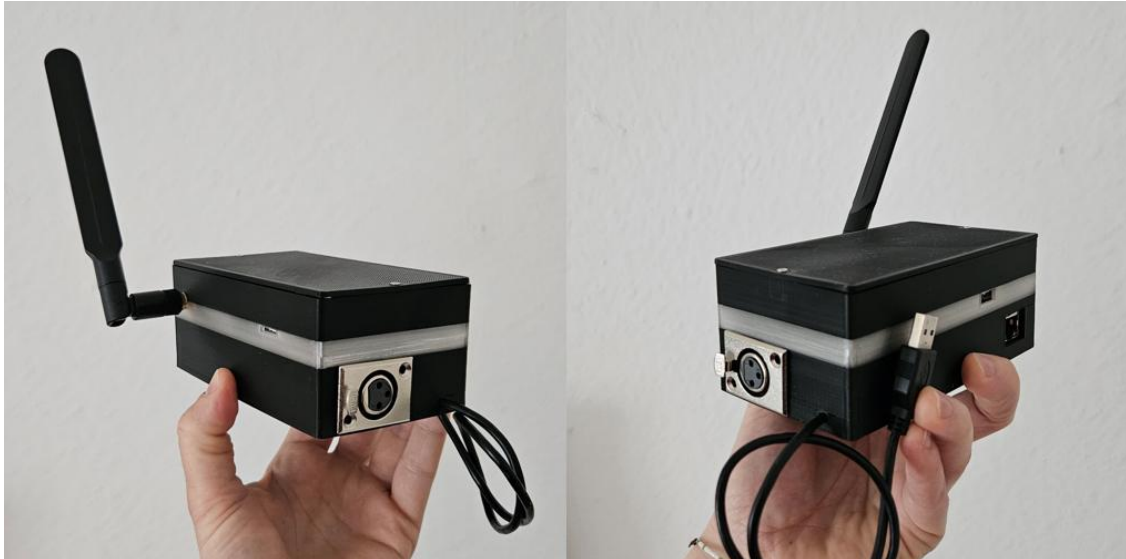


Abbildung 28: Der fertige Prototyp in einem 3D-gedruckten Gehäuse.

5.1.2 Software des Empfängers

Die Software wurde in der Programmiersprache C++ geschrieben und beruht auf der Arduino-Bibliotheksumgebung. Zusätzlich wurde die Arduino-Ethernet-Bibliothek in der Version 2.0.2 importiert, da diese das W5500-Ethernet-Modul nativ unterstützt und damit eine aufwändige Konfiguration der SPI-Schnittstelle entfällt.

Die Hauptaufgaben des Empfängers lassen sich grundlegend in drei Kernfunktionen unterteilen. Der Prototyp muss sich beim Relay-Server anhand einer Registrierungsnachricht identifizieren. Er muss die eingehenden Steuerdaten empfangen und zur lokalen Verwertung in ein angebundenes Netzwerk weiterleiten. Parallel dazu müssen die reinen DMX-Kanalwerte aus dem ArtDmx-Frame ausgelesen und als DMX512-Signal ausgegeben werden. Die implementierte Software lässt sich durch das folgende UML-Aktivitätsdiagramm visualisieren.

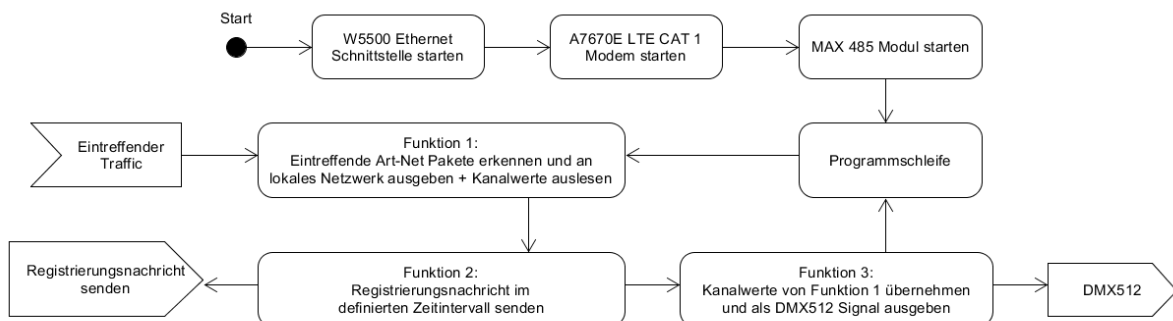


Abbildung 29: Der Programmcode der im Anhang befindlichen "main.cpp" Datei als UML-Diagramm dargestellt.

Zu Beginn erfolgt die Konfiguration des W5500-Ethernet-Moduls über den SPI-Bus. Es wird eine lokale Ziel-IP-Adresse definiert sowie der Art-Net-Port konfiguriert, an den die Steuerdaten weitergeleitet werden sollen.

Anschließend startet der Bootvorgang des Mobilfunkmodems und es wird eine Verbindung zum LTE-Netzwerk hergestellt. Dieser Prozess erfordert die Übertragung einiger AT-Befehle. Sie dienen der Konfiguration des mobilen Datenmodus und der Durchführung einer Ping-Messung zum Relay-Server. Ein wichtiger Befehl ist die Aktivierung des sogenannten Transparent Mode. Er startet die direkte Weiterleitung des gesamten eingehenden und ausgehenden UDP-Datenverkehrs über die UART-Schnittstelle an den ESP32. Im Anschluss wird erstmalig die Registrierungsnachricht zum Server gesendet.

In dem letzten Initialisierungsschritt wird die zweite UART-Schnittstelle konfiguriert, welche das MAX485-Modul für die Ausgabe des DMX512-Signals vorbereitet. Nach Ende dieser Startsequenz tritt das Programm in eine endlose Programmschleife ein, welche die drei in der Abbildung 29 gezeigten Kernfunktionen fortlaufend abspielt. Die genauen Funktionsweisen werden in den folgenden Abschnitten anhand eigener UML-Diagramme genauer erläutert.

Funktion 1: Art-Net-Paket in Datenstrom erkennen und ausgeben

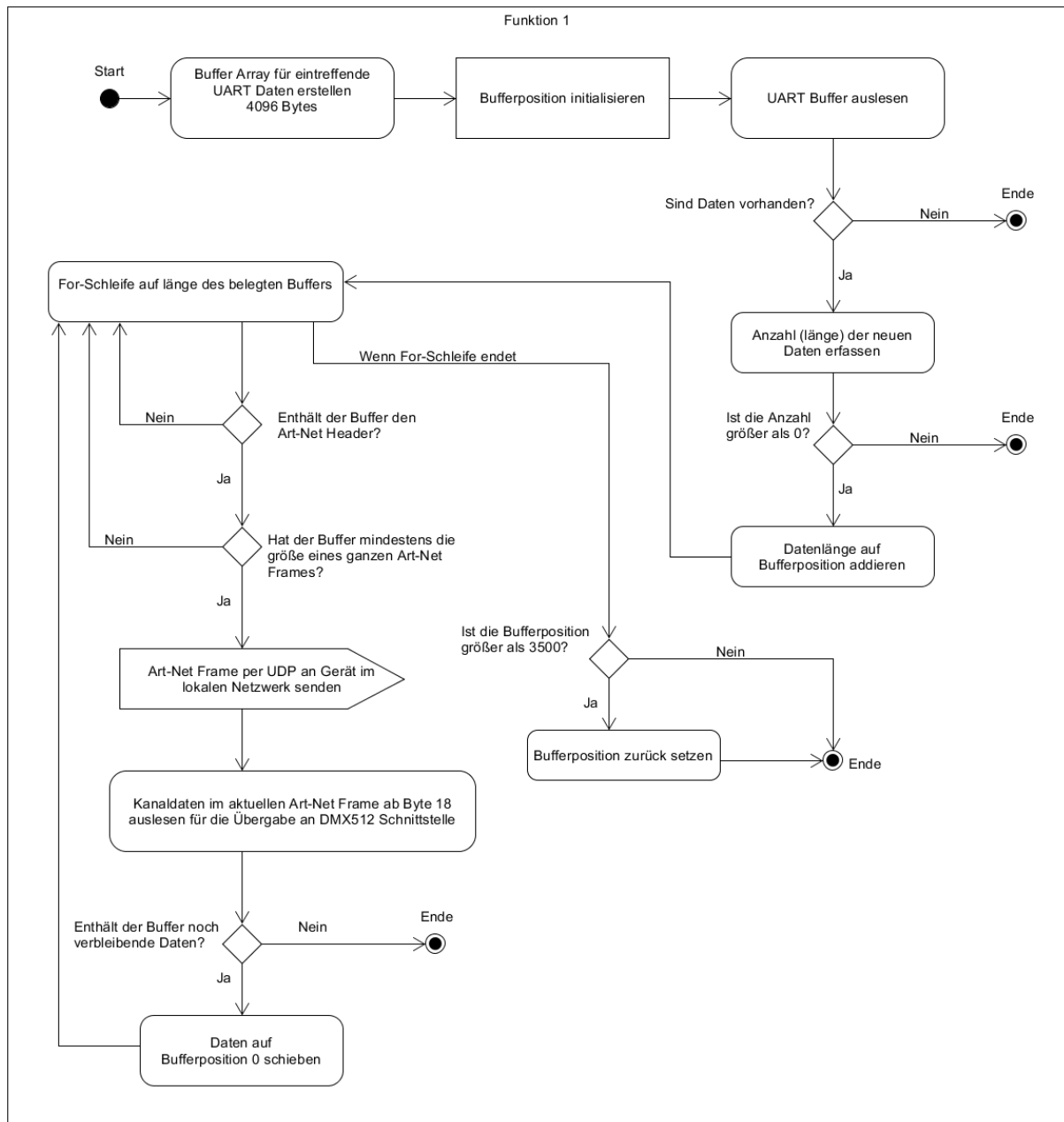


Abbildung 30: UML-Darstellung der Funktion "bridgeLteToEthernet" aus der Code-Datei "ArtNetBridge.h" im Anhang.

Da die Steuerdaten im Transparent Mode als Bytestrom am Mikrocontroller eintreffen, ist ein einfaches Abarbeiten nach Paketen nicht möglich. Um die ursprünglichen Art-Net-Pakete aus diesem Strom zu rekonstruieren, benutzt die Funktion einen Datenpuffer (Buffer).

In jedem Durchlauf der Hauptschleife wird dieser Buffer mit den anliegenden Rohdaten der UART-Schnittstelle befüllt. Anschließend werden die gespeicherten Daten nach dem Header des Art-Net-Protokolls durchsucht. Wenn dieser erkannt wird, wird geprüft, ob das Paket die typische Länge von 530 Bytes aufweist. Wenn es vollständig ist, wird es per UDP an den lokalen Empfänger

gesendet. Anschließend werden die DMX-Kanalwerte ausgelesen und für die DMX-Ausgabe zwischengespeichert.

Damit keine Daten verloren gehen, ist der Buffer von 4096 Bytes in der Lage, bis zu sechs Art-Net-Pakete aufzunehmen. Ist ein Paket erfolgreich verarbeitet, werden die verbleibenden Bytes an den Anfang des Buffers verschoben. Sollten sich aufgrund von Übertragungsfehlern im Mobilfunknetz Daten ohne gültigen Header im Speicher ansammeln, wird der Puffer ab einem Schwellenwert von 3500 Bytes zurückgesetzt.

Funktion 2: Die Registrierungsnachricht

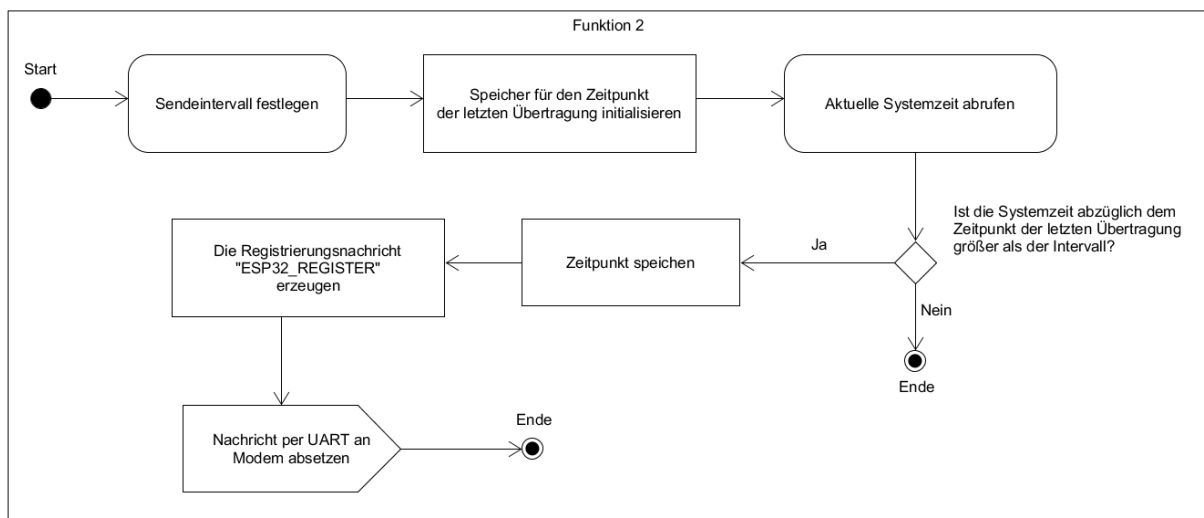


Abbildung 31: UML-Diagramm der Funktion "sendLteUdpRegMsg" aus der Code-Datei "ArtNetBridge.h" im Anhang.

Um den Empfang der Art-Net-Pakete nicht zu unterbrechen, wird in dieser Funktion eine nicht blockierende Zeitsteuerung umgesetzt. Dafür wird bei jedem Programmdurchlauf die Systemzeit erfasst. Ein Versand der Nachricht erfolgt, wenn die Differenz zum letzten Übertragungszeitpunkt das definierte Sendeintervall überschreitet.

Die gesendete Nachricht besteht aus der Zeichenkette „ESP32_REGISTER“ und wird über die UART-Schnittstelle an das LTE-Modem übergeben. Durch den aktiven Transparent Mode leitet das Modem diese Nachricht als UDP-Paket direkt an den Vermittlungsserver weiter.

Funktion 3: DMX512-Signal erzeugen

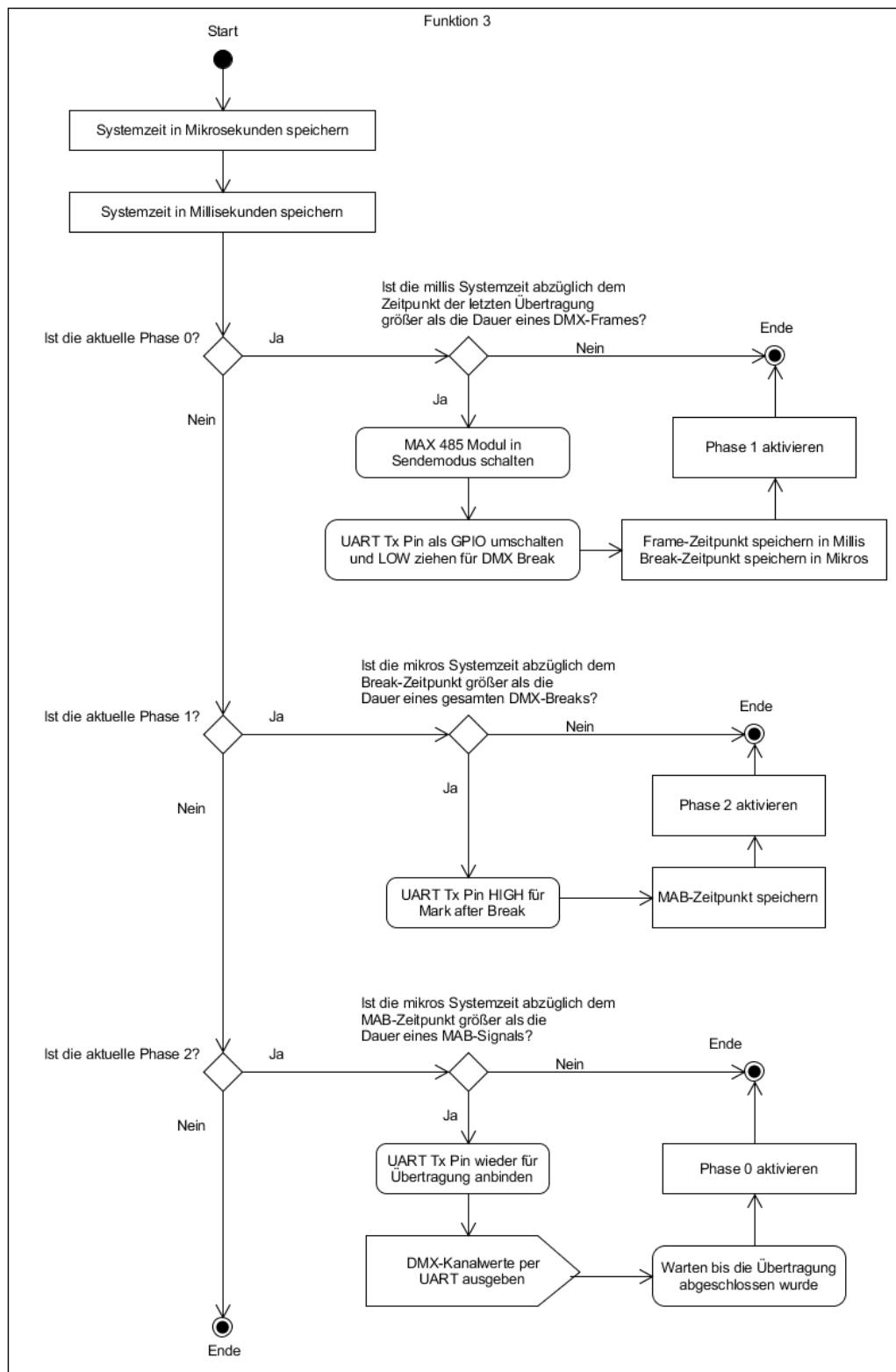


Abbildung 32: UML-Darstellung der Funktion "writeDMX" aus der Code-Datei "DMXOut.h" im Anhang.

Wie in Kapitel 3.1.1 erläutert, besitzt das DMX512-Signal einen definierten Aufbau, um den Beginn einer Übertragung anzukündigen. Die UART-Schnittstelle kann das Break-Signal (einen kontinuierlichen LOW-Pegel) von selbst nicht erzeugen. Daher muss der TX-Pin vor jeder Übertragung von der UART-Schnittstelle entkoppelt und als regulärer GPIO konfiguriert werden. Dadurch lassen sich die Zustände für die Break-Phase (LOW) und die Mark-After-Break-Phase (HIGH) manuell setzen. Im Anschluss wird der Pin für die Übertragung der Kanalwerte wieder an die UART-Schnittstelle gekoppelt.

Wie die Abbildung 32 zeigt, durchläuft die Funktion drei Phasen, die den Break, den MAB und die Übertragung widerspiegeln. Wie in Funktion 2 wird hierbei für jede Phase ein nicht blockierendes Timer-Verfahren angewendet.

Die Funktion startet in Phase 0 basierend auf der DMX-Datenrate von 44 Hz. Der TX-Pin wird entkoppelt und für das Break-Signal auf LOW gezogen, woraufhin das Programm in Phase 1 wechselt. Sobald mindestens 88 μ s vergangen sind, wird der MAB erzeugt, indem der Pin auf HIGH gesetzt wird. Nun wird in Phase 2 gewechselt. Wenn mindestens weitere 8 μ s vergangen sind, wird der TX-Pin wieder an die UART-Schnittstelle angebunden. Abschließend werden die Kanalwerte aus dem Zwischenspeicher mit dem Startbyte 0 über UART 2 ausgegeben. Danach springt das Programm für den Beginn des nächsten DMX-Frames wieder in Phase 0.

5.2 Relay-Server

5.2.1 Server-Eckdaten

Für die Bereitstellung der Vermittlungsinstanz wird im Rahmen dieser Arbeit ein Virtual Private Server (VPS) des Anbieters Strato angemietet. Bei einem VPS teilen sich mehrere Anwender die Ressourcen einer physischen Server-Hardware, welche durch den Provider verwaltet wird. In einer virtuellen Kapselung werden jedem Nutzer Rechenkapazität, Arbeitsspeicher und Festplattenspeicher zugewiesen. Häufig können die Nutzer auch zwischen verschiedenen Betriebssystemen wählen [53].

Die für diese Arbeit gewählte Serverinstanz verfügt über einen virtuellen Prozessorkern, ein Gigabyte Arbeitsspeicher sowie zehn Gigabyte internen Speicherplatz. Als Betriebssystem kommt die Linux-Distribution Debian 12 zum Einsatz. Diese Ausstattung ist für den angestrebten Einsatzzweck ausreichend, da hier lediglich ein sehr kurzes Python-Skript zur Weiterleitung von UDP-Paketen ausgeführt wird.

5.2.2 Relay-Server-Software

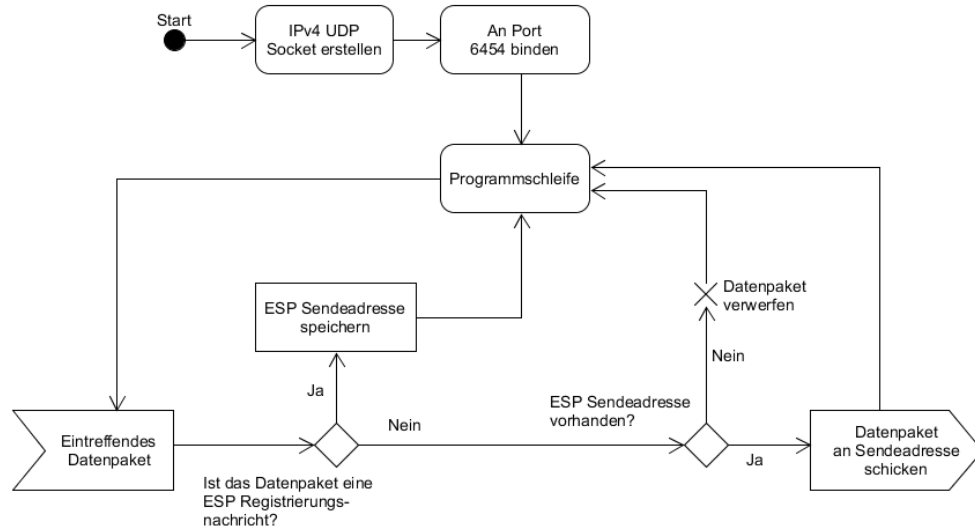


Abbildung 33: UML-Darstellung des Programmcodes "Relay.py" im Anhang

Die Abbildung 33 zeigt den Programmablauf des in Python implementierten Relay-Servers. Zu Beginn wird ein Netzwerk-Socket initialisiert, welcher der Verarbeitung von IPv4- und UDP-Paketen dient. Anschließend wird er an den Art-Net-Port 6454 gebunden, wodurch nun auf dort eintreffenden Datenverkehr gewartet wird. Danach beginnt die Programmschleife zur Weiterleitung der Steuersignale.

Wenn ein Paket an dem Port eintrifft, wird nach der Nachricht „ESP32_REGISTER“ gesucht. Ist diese Nachricht vorhanden, werden die öffentliche Quell-IP-Adresse sowie der Quell-Port des Absenders gespeichert. Sie dienen nun als neue Zieladresse für die Art-Net-Pakete an den Empfänger. Hier ist zu beachten, dass sich neben der IP-Adresse auch der Quell-Port des Empfängers durch CGNAT ändert. Würde man die Pakete einfach an den Port 6454 senden, kämen diese nicht beim Empfänger an.

Wenn ein eintreffendes Paket keine Registrierungsnachricht ist, wird davon ausgegangen, dass es sich um Art-Net-Pakete der Sendeinstanz handelt. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob bereits eine Zieladresse gespeichert wurde. Ist das nicht der Fall, da sich der Hardware-Prototyp noch nicht registriert hat, wird das Datenpaket verworfen. Wenn hier eine Zieladresse vorliegt, wird das Paket an diese weitergeleitet.

5.3 Sender

Die Art-Net-Steuerdaten werden von einem lokalen PC erzeugt, der über Ethernet an einen DSL-Router angeschlossen ist. Der genutzte Tarif ist DSL 50 von 1&1 mit einer verfügbaren Upload-Bandbreite von 20 Mbit/s [54].

Zur Erzeugung der Steuerdaten werden je nach Fokus der Evaluierung zwei verschiedene Programme genutzt. Für die Messungen des Paketverlusts kommt das Programm DMX-Workshop von Singularity zum Einsatz. Für die qualitative optische Bewertung wird zusätzlich Resolume Arena verwendet. Letzteres ist eigentlich ein Programm für Videomapping, kann aber auch ArtDmx-Pakete erzeugen. Es eignet sich für die optische Auswertung, da das erzeugte Farbsignal deutlich in der Programmoberfläche dargestellt wird.

6. Evaluierung

Dieses Kapitel evaluiert die Praxistauglichkeit des entwickelten Systems. Es wird geprüft, ob die empfangenen Steuerdaten vollständig, mit konstanter Übertragungsrate und schnell genug für den professionellen Einsatz ausgegeben werden. Die Evaluierung gliedert sich dafür in drei Versuche: Zuerst wird die DMX-Signalintegrität getestet, gefolgt von einer optischen Latenzanalyse des Gesamtsystems unter annähernden Idealbedingungen. Der Kern der Evaluierung ist anschließend ein Feldversuch unter realen Bedingungen auf der Großveranstaltung Hamburger DOM. Um den Einfluss der Publikumsdichte auf die Übertragungsstabilität des Art-Net-Signals zu bewerten, wird an zwei Zeitpunkten mit unterschiedlicher Publikumsauslastung gemessen.

Alle Messungen werden mit dem Tarif Magenta Prepaid M der Telekom durchgeführt. Laut Produktdatenblatt stellt dieser Vertrag eine theoretische Maximalbandbreite von 300 Mbit/s im Download und 50 Mbit/s im Upload zur Verfügung [55].

6.1 DMX-Funktionalität des Empfängers

Im Folgenden wird erprobt, ob DMX512-fähiges Equipment das Steuersignal des Hardware-Prototypen erkennen und verarbeiten kann.

6.1.1 Methodik und Aufbau

Zur Überprüfung der DMX512-Signalintegrität werden zwei Scheinwerfer (Pure Light Piko Par 1) im Vierkanalmodus an die DMX512-Schnittstelle des Empfängers angeschlossen. Um die fehlerfreie Übertragung des gesamten DMX-Universums nachzuweisen, werden die Geräte in Resolume Arena an die Ränder des Universums gepatcht. Der erste Scheinwerfer liegt auf Kanal 1 und der zweite auf Kanal 509. Die DMX-Signalkette wird am Ende vorschriftsmäßig mit einem Abschlusswiderstand terminiert.

Im Testlauf erhält der erste Scheinwerfer den Farbwert Blau (RGBW 0, 0, 255, 0) und der zweite Scheinwerfer den Farbwert Rot (RGBW 255, 0, 0, 0). Die Art-Net-Steuerdaten werden dabei unter realen Bedingungen über den aktiven Relay-Server und das LTE-Netz übertragen.

6.1.2 Ergebnis



Abbildung 34: Ergebnis des Versuchs zur DMX512-Protokollkonformität: die zwei Scheinwerfer zeigen das erwartete Signal.

Der Versuch bestätigt die Protokollkonformität des entwickelten Empfängers. Beide Scheinwerfer erkennen das Signal sofort und fehlerfrei als DMX-Signal. Die statischen Farbwerte an den Grenzen des Universums werden ohne Aussetzer wiedergegeben, was das korrekte Übertragen des gesamten Arrays belegt.

Auch dynamische Werteänderungen wie zeitliche Farbverläufe oder Dimmvorgänge werden flüssig und ohne sichtbare Helligkeitssprünge dargestellt. Dieses Ergebnis beweist, dass die implementierte Funktion zur Erzeugung des DMX-Signals das Timing der Initialisierungssignale einhält und die Datenausgabe unterbrechungsfrei arbeitet.

6.2 Optische Latenzanalyse des Gesamtsystems

Dieser Versuch ermittelt die Latenz des Gesamtsystems anhand einer Videoaufnahme des Programms der Sendeinstanz und der Ausgabe über DMX512 am Empfänger über einen PAR-Scheinwerfer.

6.2.1 Methodik und Aufbau

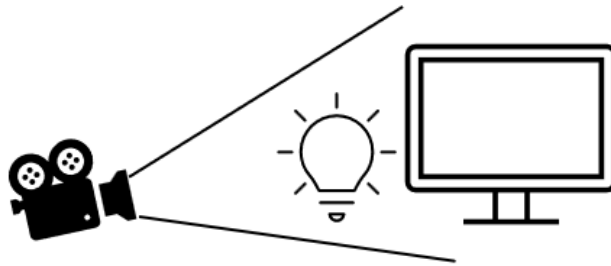


Abbildung 35: Eine Skizze des Versuchsaufbaus zur Ermittlung der Gesamtlatenz.

Zur Ermittlung der Systemlatenz unter Idealbedingungen wird eine optische Messmethode angewendet. Diese bildet die vollständige Signalkette vom softwareseitigen Impuls bis zur sichtbaren Lichtausgabe ab. Der Empfänger wird samt Scheinwerfer neben dem Sende-PC positioniert. Für den Versuch wurde sich eine Sony-FX3-Kamera aus dem Videolabor der HAW Hamburg geliehen. Die Kamera zeichnet den Aufbau mit 120 Bildern pro Sekunde auf und erfasst dabei den Monitor (Iyama ProLite XUB3493WQSU-B1) und den angeschlossenen Scheinwerfer.

In Resolume Arena wird ein abrupter Signalwechsel von schwarz auf weiß ausgelöst. Die Latenzmessung erfolgt durch die Auswertung des Video-Timecodes zwischen der sichtbaren Monitorreaktion und dem Aufleuchten des Scheinwerfers. Die systematische Genauigkeit dieser Erfassung ist durch zwei Faktoren limitiert. Die Kamera-Framerate ergibt eine zeitliche Auflösung von 8,3 ms pro Einzelbild, sodass dieser Wert die Messtoleranz im positiven und negativen Bereich darstellt. Zusätzlich ist die Reaktionszeit des Monitors von 4 ms als Verzögerungsfaktor zu berücksichtigen [56].

6.2.2 Durchführung und Messergebnisse

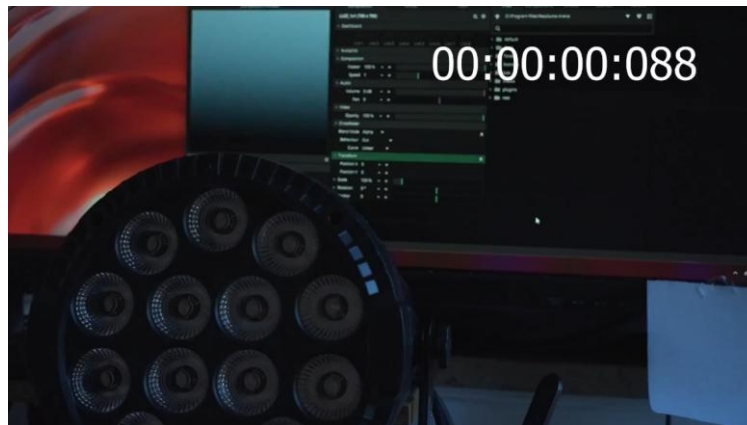


Abbildung 36: Zeitpunkt der ersten Reaktion auf dem Monitor.

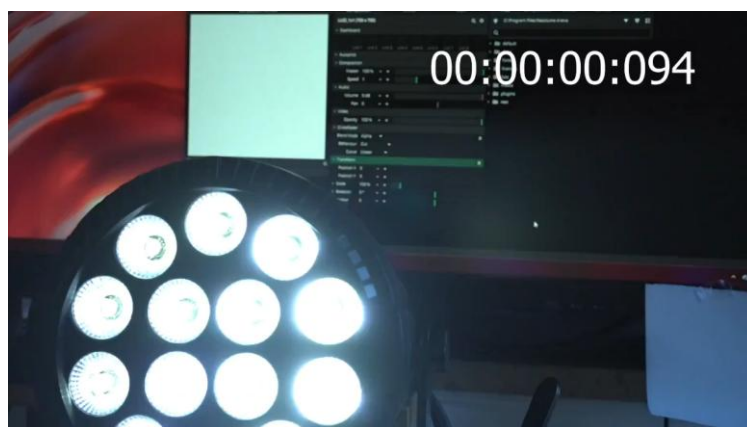


Abbildung 37: Zeitpunkt der Reaktion des Scheinwerfers.

Die Messung wurde am 20.04.2026 um 19:00 bei geöffnetem Fenster durchgeführt. Der Standort der Messung ist die Schäferkampsallee 57 in 20357 Hamburg.

Die Abbildung 36 zeigt den Impuls seitens der Software auf dem Monitor erstmalig bei der Timecode-Position 00:00:00:088. Der Scheinwerfer zeigt zu diesem Zeitpunkt noch keine Reaktion. Wie in Abbildung 37 zu sehen, beginnt die Lichtausgabe am Scheinwerfer bei der Timecode-Position 00:00:00:094.

Zwischen dem visuellen Impuls am Sender und der Reaktion am Empfänger liegt eine Differenz von sechs Videoframes. Bei einer Aufnahmezeit von 120 Bildern pro Sekunde entspricht dies einer gemessenen Latenzzeit von 50 ms. Unter Berücksichtigung der Verzögerung des Monitors erhöht sich dieser Wert auf 54 ms. Wendet man nun die Toleranz der Kamera an, liegt die Gesamtlatenz des Systems im besten Fall bei 45,7 ms und im schlechtesten Fall bei 62,3 ms.

6.3 Feldversuch auf dem Hamburger DOM

Der folgende Abschnitt behandelt die Messungen der Verbindungsstabilität und des Paketverlustes unter den realen Bedingungen einer Großveranstaltung. Der Hamburger Frühlings-Dom fand vom 20.03.2026 bis zum 19.04.2026 statt und zählte dieses Jahr insgesamt 1,3 Millionen Besucher [57].

6.3.1 Methodik und Aufbau

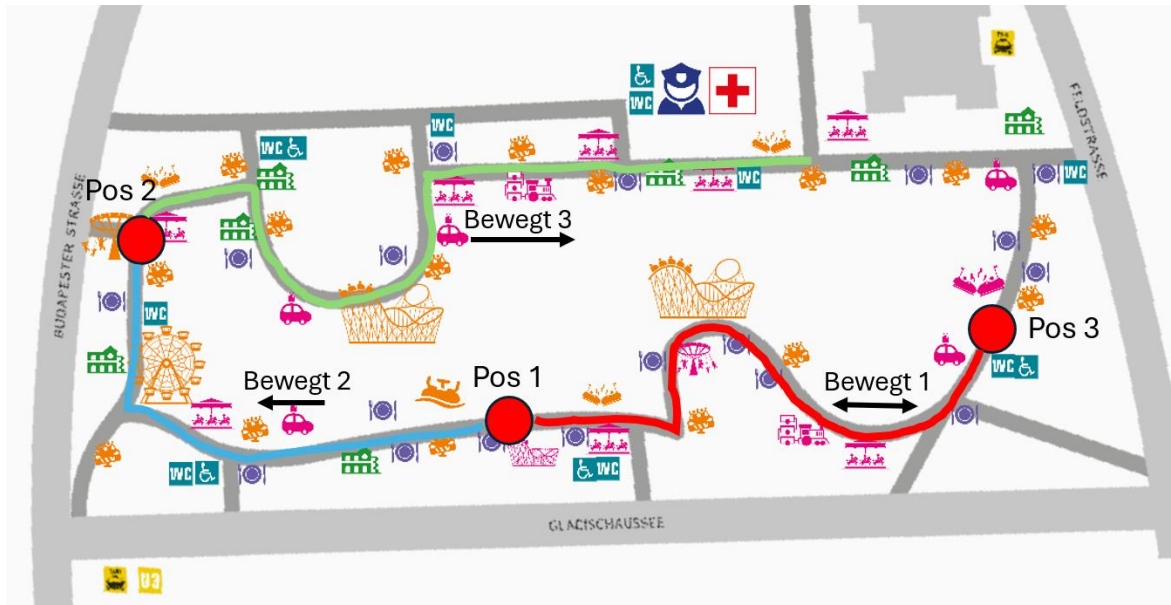


Abbildung 38: Ein Screenshot vom Geländeplan des Hamburger DOMs mit den eingezeichneten Messpositionen und Routen [58].

Der Versuch umfasst jeweils drei statische und drei mobile Messungen. Die genauen Positionen und Routen wurden im Geländeplan (Abbildung 38) eingezeichnet. Um den Einfluss der Publikumsdichte auf die Übertragungsqualität zu untersuchen, fanden die Hauptmessungen bei hoher Personendichte am Freitag, dem 17. April 2026, ab 21:00 Uhr statt. Eine Referenzmessung bei geringerer Auslastung erfolgte am Samstag, dem 18. April 2026, ab 15:00 Uhr.

Der Prototyp wird über eine Powerbank (5 V, 2.1 A) versorgt und ist per Netzkabel direkt an einen Laptop angeschlossen. Dort zeichnet das Programm Wireshark die vom Server eintreffenden Art-Net-Pakete auf. Zu Beginn jeder Einzelmessung wird ein Ping zum Vermittlungsserver dokumentiert. Die anschließende Auswertung fokussiert sich auf die Berechnung des prozentualen Paketverlusts sowie die Analyse der eintreffenden Pakete pro Sekunde.

6.3.2 Durchführung und Messergebnisse

Die Datenerfassung erfolgte an den im Geländeplan markierten Standorten. Die mobilen Messreihen wurden in der eingezeichneten Pfeilrichtung absolviert. Die rote Route 1 umfasst dabei sowohl den Hinweg als auch den Rückweg. Für die Vergleichbarkeit aller Einzelmessungen wurde das zeitliche Auswertungsfenster einheitlich auf 530 Sekunden festgelegt. Dies entspricht der Dauer der kürzesten erfassten Messreihe. Die Sendeinstanz schickt anhand der Software DMX-Workshop von Singularity einen Art-Net Stream mit einer Rate von 33 Paketen pro Sekunde zum Relay-Server. Dementsprechend sind bei einer Messdauer von 530 Sekunden maximal 17490 Pakete am Empfänger zu erwarten.

Analyse des Paketverlustes

Im Folgenden wird der Paketverlust als Indikator für die Übertragungsqualität diskutiert und anhand der drei aussagekräftigsten Zeitverläufe dargestellt. Alle weiteren Diagramme und Tabellen sind zur Vollständigkeit im Anhang dokumentiert.

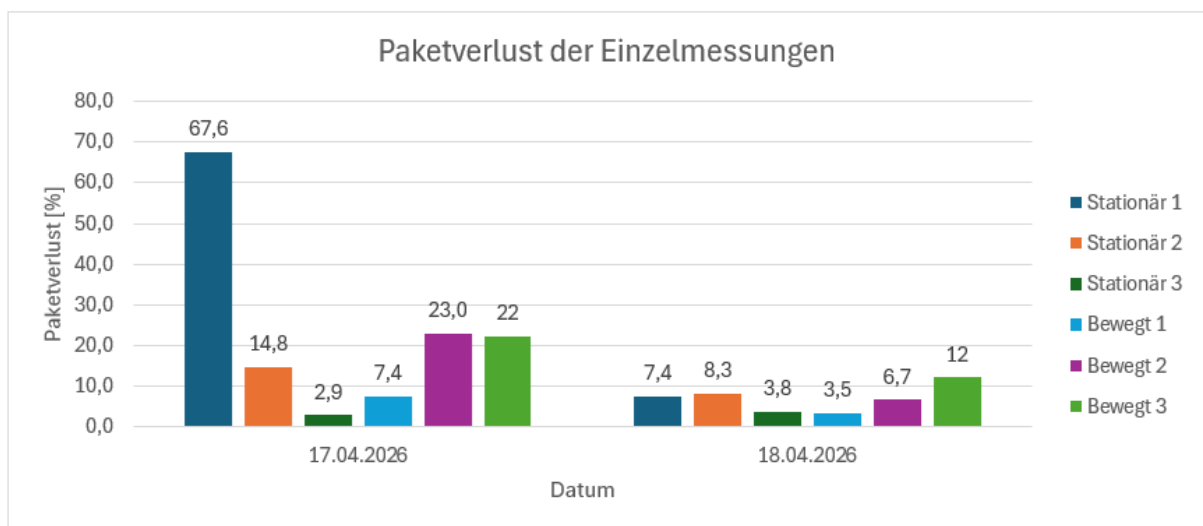


Abbildung 39: Darstellung des prozentualen Paketverlustes über den Zeitraum der jeweiligen Gesamtmessdauer an den beiden Versuchstagen.

Die Gegenüberstellung der Paketverluste in Abbildung 39 zeigt, dass die Fehlerquoten am Freitagabend fast ausnahmslos höher ausfallen als bei den Vergleichsmessungen am Folgetag. Sehr deutlich sticht die erste stationäre Messung am Abend mit einem Paketverlust von 67,6 % hervor. Dieser hohe Wert lässt sich direkt mit der lokalen Publikumsdichte erklären. Zum Zeitpunkt der Erfassung (21:35 Uhr) befanden sich schätzungsweise zwei Personen pro Quadratmeter im Messbereich, was den Höchstwert der gesamten Versuchsreihe darstellt.

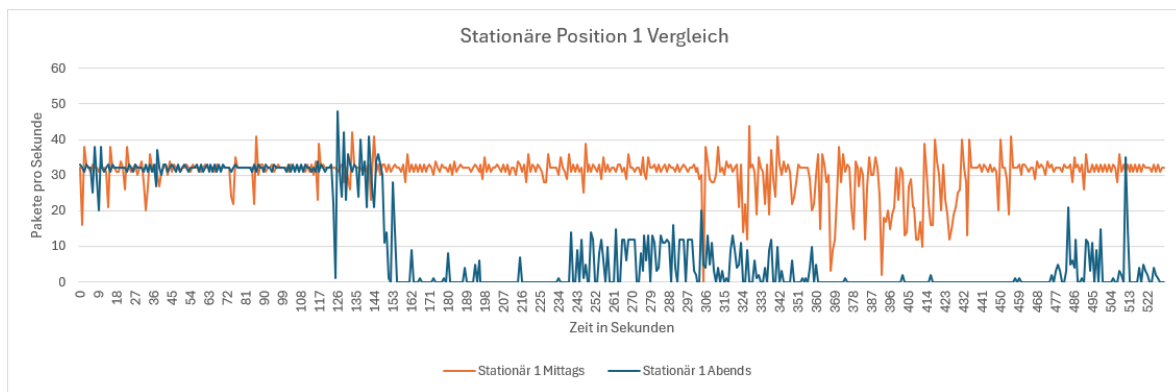


Abbildung 40: Die zeitliche Darstellung der am Laptop eintreffenden Paketrage pro Sekunde für die erste stationäre Position.

Das Diagramm (Abbildung 40) zeigt die Anzahl der empfangenen Pakete pro Sekunde über den Zeitraum der ersten stationären Messung und verdeutlicht den auftretenden Paketverlust anhand des blauen Graphen. Nach etwa 120 Sekunden verhält sich die Rate instabil, bricht anschließend komplett ein und erholt sich im weiteren Verlauf nicht mehr. Die Referenzmessung am Folgetag bei einer Personendichte von 0,5 Personen pro Quadratmeter weist an derselben Position eine messbar höhere Stabilität auf, unterliegt jedoch ebenfalls deutlichen Schwankungen. Begründen lässt sich diese generelle Instabilität mit der zentralen Lage des Messpunktes mitten auf dem Veranstaltungsgelände. Einerseits teilen sich viele Besucher mit aktiven Mobilgeräten die verfügbare Kapazität des nächstgelegenen eNodeBs, andererseits kann es durch die hohe Dichte an Geräten zu Signalstörungen kommen.

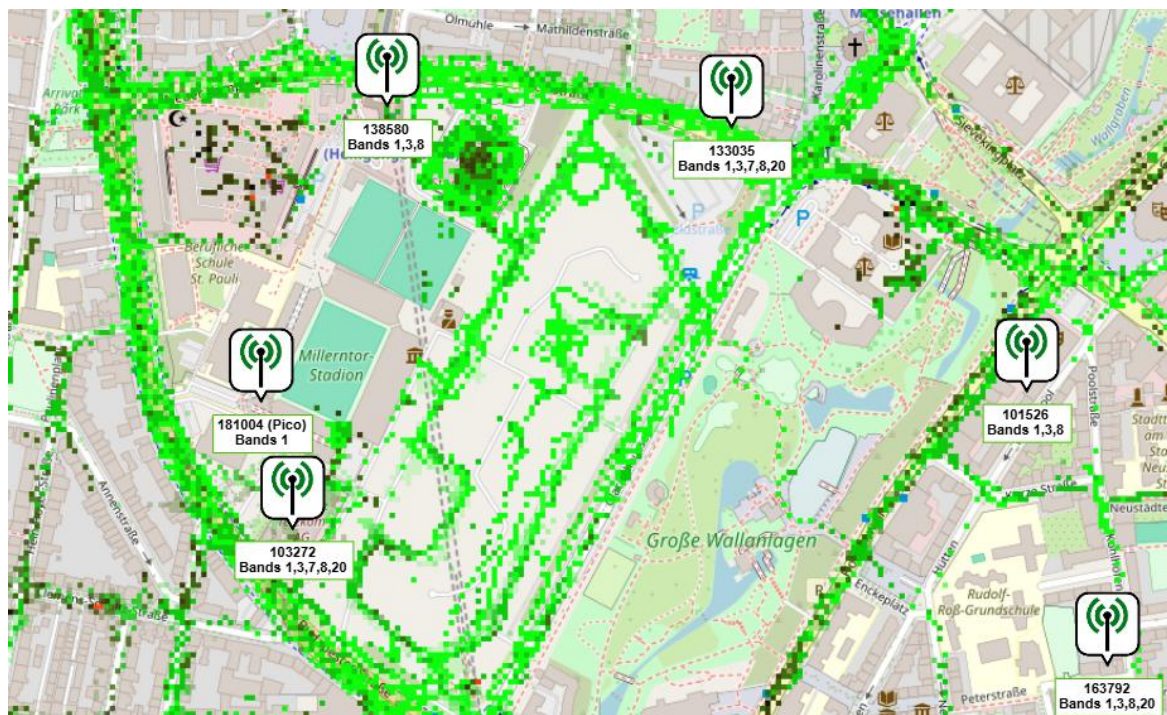


Abbildung 41: Ein Screenshot der Karte von www.cellmapper.net mit den Filtereinstellungen: Telekom.de, 4G-LTE.

Auch der Blick auf die Karte von Cellmapper.net, welche die aktiven LTE-eNodeBs von Telekom zeigt, stützt die These, dass die statische Messposition 1 am entferntesten von allen Basisstationen liegt.

Das folgende Diagramm zeigt die Paketrage pro Sekunde auf der Messroute 2. Eben die Bewegung von Position 1 weg und hin zu Position 2.

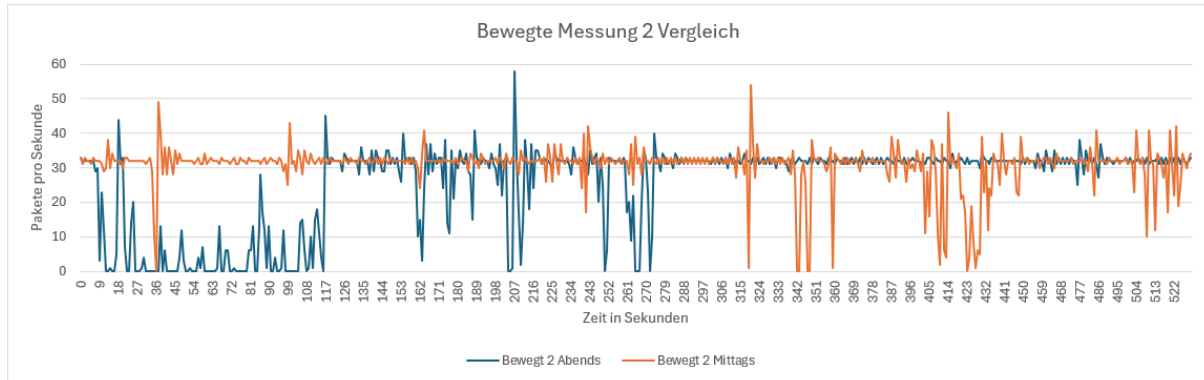


Abbildung 42: Die zeitliche Darstellung der am Laptop eintreffenden Paketrage pro Sekunde für die zweite bewegte Messung.

Auch hier zeigt der blaue Graph einen massiven Einbruch zu Beginn, aber nach 117 Sekunden eine Erholung der Paketrage in der Messung abends. Dieses Verhalten stimmt mit zwei Faktoren an den lokalen Gegebenheiten überein. Der Prototyp bewegt sich in Richtung des linken Rands des Veranstaltungsgeländes und die Publikumsdichte nimmt zusätzlich ab, von geschätzten zwei auf 1,5 Personen pro Quadratmeter. Dennoch sind die Paketraten in diesem Bereich sehr instabil, obwohl sich eine eNodeB im direkten Umkreis befindet. Ein Grund könnte die Belastung der Funkzelle durch den Straßenverkehr neben dem Gelände darstellen. Zusätzlich zu den mobilen Endgeräten der Fahrer verfügen viele Autos inzwischen über eine integrierte Mobilfunk-Anbindung, die in Ampelphasen schubweise die Zelle belasten.

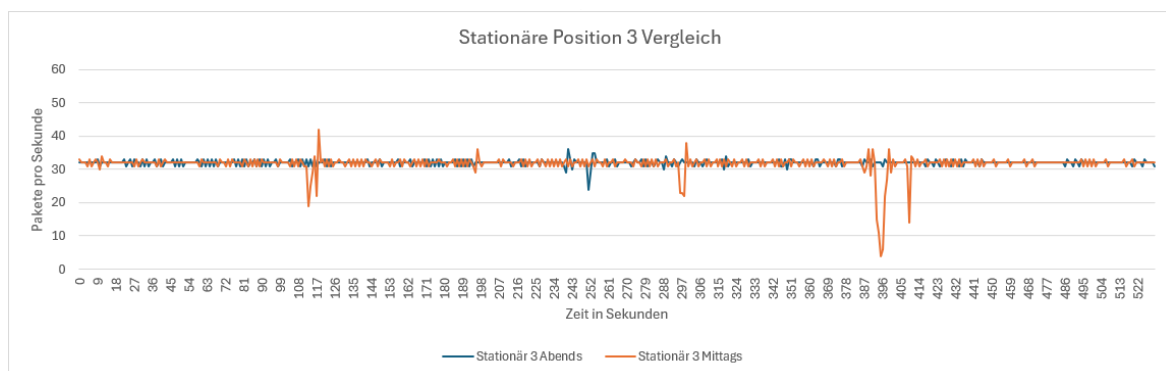


Abbildung 43: Die zeitliche Darstellung der am Laptop eintreffenden Paketrage pro Sekunde für die dritte stationäre Position.

Mit einem besonders niedrigen Paketverlust von 2,9 % sind in der Abbildung 39 die stationären Messungen an der Position 3 positiv auffällig. Hier zeigt der Zeitverlauf am Abend eine weitgehend stabile Paketrage von 33 Hz und übertrifft dabei sogar geringfügig den Referenzwert vom Mittag. Dieses Ergebnis spiegelt erneut die Situation vor Ort wider, da Position 3 am äußersten rechten Rand des Geländes liegt und bei beiden Messungen die geringste Personendichte aufwies. Ebenfalls befindet sich, laut Cellmapper, die Position in direkter Nähe der eNodeB 133035.

Die Auswertung der vorliegenden Daten zeigt deutlich, dass die Stabilität der Übertragung vor allem in Abhängigkeit der Personendichte und -menge steht. Die Paketrage unterliegt teilweise deutlichen Einbrüchen und Schwankungen.

Analyse des Pings

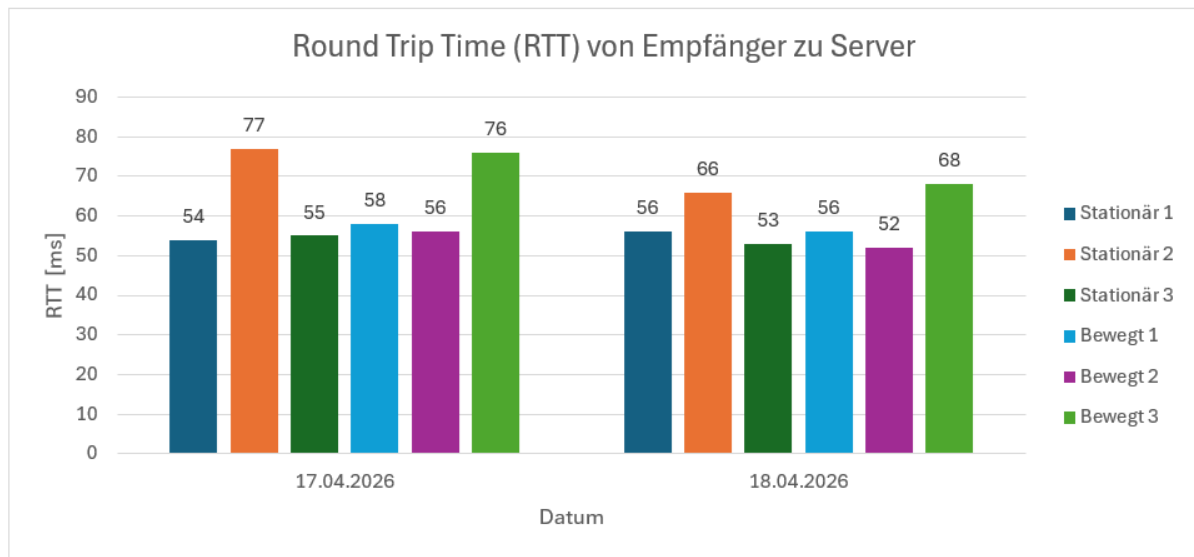


Abbildung 44: Die RTTs der Messpositionen unmittelbar vor jeder Messung.

Zu Beginn jeder Messreihe auf dem Dom wurde der Ping vom Empfänger zum Relay-Server erfasst. Die in der Abbildung 44 gezeigten Daten sind Durchschnittswerte aus vier Round-Trip-Times (RTT).

Zunächst ist hierbei auffällig, dass sich im Gegensatz zu den Paketverlusten, die Werte zwischen den Messungen abends und mittags nur geringfügig unterscheiden. Mit einer hohen Abweichung stechen hierbei zwei Ergebnisse besonders hervor. Die Messung an Position 1 und die dritte bewegte Messung wurden beide an dem linken Rand des Veranstaltungsgeländes durchgeführt, was die Ähnlichkeit der Werte erklärt. Die restlichen RTTs unterscheiden sich nur um 2-3 ms zu den Referenzwerten.

Darin lässt sich erkennen, dass die Ping-Zeiten weniger von der Publikumsdichte, sondern mehr von dem Standort des Empfängers beeinflusst werden. Wie bereits in Kapitel 4.3 erwähnt, wäre

eine Aussage über die Latenzzeit anhand der Round-Trip-Time durch die Protokoll-Unterschiede zu gewagt.

6.4 Aufstellung der Kosten des Gesamtsystems

Neben den Kosten für die Bauteile des Hardware-Prototyps, die in Kapitel 4.5 (Tabelle 7) mit einer Summe von 56,66 € berechnet wurden, gibt es für das System zwei weitere laufende Kostenpunkte.

Für den Betrieb des Linux-VPS-Servers bei dem Anbieter Strato wurde der Tarif VC 1-1 gewählt. Dafür fallen monatlich laufende Kosten von einem Euro an und eine einmalige Gebühr von 9 € für die Einrichtung des Servers [59]. Des Weiteren sind die monatlich wiederkehrenden Kosten für den Mobilfunkvertrag zu berücksichtigen. Für dieses Projekt wurde ein Prepaid-Vertrag bei der Telekom abgeschlossen mit einem Datenvolumen von 20 Gigabyte pro Monat für 9,95 € [60].

Für die einmaligen Anschaffungskosten ergibt sich daraus eine Summe von 65,66 € und die monatlichen Unterhaltskosten des Gesamtsystems liegen damit bei 10,95 € zum Stand April 2026.

6.5 Interpretation der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Gesamtergebnisse interpretiert und den Anforderungen an das System aus dem Kapitel 2.3 gegenübergestellt.

Anhand der Versuchsreihe konnte bewiesen werden, dass sich das System für die Übertragung von Lichtsteuerdaten grundsätzlich eignet. Der Empfänger verbindet sich nach jedem Start selbstständig mit dem Mobilfunknetz und sendet das Registrierungspaket zuverlässig zum Relay-Server. Auch seitens des Servers funktioniert die Registrierung problemlos und die dort eintreffenden Art-Net-Pakete der Sendeinstanz werden zum Hardware-Prototypen weitergeleitet.

Der Empfänger ist in der Lage, die bei ihm eintreffenden Art-Net-Pakete vollständig an ein Gerät in einem lokal angebundenen Netzwerk abzusetzen. Des Weiteren liest er die Kanalwerte erfolgreich aus und kann sie auch als DMX512-Signal in ein Lichtsystem flüssig umsetzen.

Mit einer Gesamtverzögerung von circa 54 ms (+- 8,3 ms) liegt das System an der oberen Grenze der Anforderungen an die Latenz. Es eignet sich in diesem Status also nur bedingt für einen Einsatz, bei dem es auf Synchronität zu beispielsweise einem Tonsignal ankommt.

Ein großer Schwachpunkt ist der Paketverlust des Empfängers, wenn die Personendichte im Messbereich zunimmt. Mit einem Datenverlust von bis zu 67 % über die Gesamtdauer einer Messung, arbeitet das System bei geschätzten zwei Personen pro Quadratmeter nicht

zuverlässig. Auch wenn die Messung als Extremwert heraussticht, weisen die anderen Messungen dennoch zu hohe Paketverluste auf. Für ein angeschlossenes Lichtsystem würde dies bedeuten, dass dynamische Änderungen wie Farb-Fades oder Dimmvorgänge sichtbare Ruckler aufweisen. Für Scheinwerfer mit mechanischen Komponenten wie Moving-Heads könnte sich das wie ein Freeze in der Bewegung auswirken, mit einem anschließenden Sprung auf neu eintreffende Werte.

Ein geeigneter Anwendungsfall für den aktuellen Zustand des Systems könnte die Ambient-Beleuchtung einer Veranstaltung mit geringer Personendichte sein. Langsame Farb-Fades und statische Lichtbilder sind gut umsetzbar.

Für letzteres wäre es sogar preislich attraktiv. Es fallen einmalig Kosten von 65,66 € in der Anschaffung an und ein monatlicher Unterhalt von 10,95 € für den Server und einen Mobilfunkvertrag. Die monatlichen Kosten könnten durch die Nutzung eines günstigeren Tarifs reduziert werden, oder nur durch eine zeitweise Aufladung eines Prepaid-Vertrags wie im Fall dieser Arbeit. Damit ist das System kostengünstiger als die in Kapitel 2.2 erwähnten Wireless-DMX-Lösungen und bietet gleichzeitig eine größere örtliche Flexibilität, solange sich der Empfänger im Abdeckungsbereich des Mobilfunknetzes befindet.

6.6 Kritik der Methodik

Für die Messung der Gesamtlatenz und die Erfassungen im Feldversuch sind folgende technische Einschränkungen zu berücksichtigen, welche die Präzision und die Aussagekraft der Ergebnisse beeinflusst haben.

Die Messung der Latenzzeit wurde mit einer Kamera durchgeführt, die 120 FPS erfasst. Das führt zu einer Messtoleranz von $\pm 8,3$ ms, was für eine Aussage über die Latenzzeit eine sehr hohe Abweichung darstellt. Anhand einer Hochgeschwindigkeitskamera mit 1000 FPS könnten hier Millisekunden genaue Ergebnisse festgehalten werden.

Die gemessenen Daten im Feldversuch beschränken sich auf die Paketrage pro Sekunde, die Anzahl aller eintreffenden Pakete und den Ping zum Relay-Server. Mit dem Prototyp war es nicht möglich parallel zur Datenerfassung weitere Werte wie die Signalstärke oder die ID der eNodeB zu erfassen, da das Modem im Transparent Mode keine AT-Befehle verarbeitet. Es wurde versucht den RSSI vor dem Wechsel in den Datenmodus zu erfassen, allerdings zeigte das Modem immer einen statischen Wert von 31,99. Da dies auf eine Fehlfunktion des Modems hindeutet, wurden diese Werte als ungültig eingestuft und von der Auswertung ausgeschlossen. Anhand dieser Informationen hätten sich, über die geschätzte Publikumsdichte hinaus, noch mehr Aussagen über die Ursache des Paketverlusts treffen lassen. Des Weiteren würde eine Methode zur Messung der Gesamtlatenz im Feldversuch eine noch präzisere Beurteilung über die Praxistauglichkeit des Systems erlauben.

7. Fazit

Um die Verteilung von Lichtsteuerdaten auf dezentralen Großveranstaltungen effizienter umzusetzen, wurde in dieser Arbeit ein System für die Übertragung des Art-Net-Protokolls über das Mobilfunknetz entwickelt. Nach der Analyse möglicher Anwendungsfälle wurden Anforderungen an die Stabilität und Latenz des Systems definiert. Nach der Erläuterung technischer Grundlagen über Lichtsysteme, Netzwerke und Mobilfunkstandards wurde ein Systemdesign erstellt. Die Entscheidung fiel auf eine Architektur bestehend aus einem Empfänger, Sender und einem Relay-Server. Als Empfänger diente ein Hardware-Prototyp, auf welchem ein LTE-CAT-1-Mobilfunkmodul, eine Netzwerk- und DMX512-Schnittstelle implementiert wurden. Ein PC sendete anhand einer Software Art-Net-Steuerdaten an einen Linux-VPS-Server, der die Vermittlungsinstanz bildete. Für den Server und den Hardware-Prototyp wurden jeweils Funktionen entworfen und als Software implementiert.

Die Methodik der Evaluierung umfasste eine dreiteilige Versuchsreihe, um die Erfüllung der qualitativen und funktionalen Anforderungen zu prüfen. Der erste Versuch untersuchte die Signalintegrität der DMX512-Schnittstelle anhand von zwei Scheinwerfern. Der zweite Versuch stellte eine optische Erfassung der Latenz des Gesamtsystems, mittels der Auswertung eines Timecodes von einer Videoaufnahme dar. Der letzte Teil der Evaluierung war die Messung des Paketverlusts im Rahmen der Großveranstaltung Hamburger DOM. Die Erhebung der Messdaten fand an zwei Tagen zu Zeitpunkten mit unterschiedlicher Publikumsauslastung statt, indem die am Empfänger eintreffenden Art-Net-Pakete aufgezeichnet und gezählt wurden.

Die Versuchsreihe hat bewiesen, dass die funktionellen Anforderungen an das System erfüllt sind. Der Prototyp verbindet sich selbstständig mit dem Mobilfunknetz, registriert sich bei dem Server und gibt die eintreffenden Art-Net-Pakete entweder als DMX512-Signal aus oder leitet sie in ein lokales Netzwerk weiter. Die gemessene Latenz des Gesamtsystems liegt unter den gegebenen Bedingungen in einem gerade noch akzeptablen Bereich. Die Messreihen auf der Großveranstaltung zeigen allerdings die Grenzen des Systems auf. Mit zunehmender Publikumsdichte verhält sich der Empfang instabil, was zu hohen Paketverlusten führt.

8. Ausblick

Im Folgenden werden sinnvolle Erweiterungsmöglichkeiten auch im Hinblick auf die Skalierbarkeit des Systems diskutiert. Darauf folgt ein Ausblick auf die Möglichkeiten, die sich durch die Implementierung von dem Mobilfunkstandard 5G ergeben könnten.

8.1 Erweiterungsmöglichkeiten und Skalierbarkeit

Die Software des Relay-Servers bietet viel Potential zur Erweiterung. Wie in Kapitel 5.1.2 erläutert, ist in dem Programm bisher nur eine Registrierungsnachricht hinterlegt. Im Sinne der Skalierbarkeit könnten sich mehrere Empfänger anhand individueller Nachrichten am Server identifizieren. So wäre es beispielsweise möglich, ein eintreffendes Art-Net-Signal mit mehreren Universen zu trennen und wie im Beispiel in Kapitel 2.1 Szenario 3 auf verschiedene Empfänger aufzuteilen. Auch für die Sicherheit des Systems ist eine kurze Analyse der Pakete im Server wichtig. Im aktuellen Zustand könnte ein potenzieller Angreifer bei Kenntnis der Server-IP-Adresse und des Ports jegliche Daten an den Empfänger senden.

Eine weitere sinnvolle Implementierung wäre eine abrufbare Statusmeldung des Servers, für die Fehlersuche bei auftretenden Problemen mit dem System. Sie könnte eine Liste mit den aktiv registrierten Empfängern beinhalten und ob ein Art-Net-Signal am Port 6454 vorliegt. Für die Rückversicherung wäre auch eine Empfangsbestätigung der Registrierungsnachricht vorteilhaft.

Auch für den Hardware-Prototypen gibt es Optimierungsansätze. Zunächst wäre ein Upgrade des Mobilfunkmodems auf eine höhere LTE-Kategorie sinnvoll, wie beispielsweise die CAT-10 (Advanced). Diese nutzt die 4x4 Multiple Input Multiple Output (MIMO) Mehrantennen-Technologie, wodurch eine höhere Datenrate und mehr Stabilität erreicht werden könnte. Das aktuell verbaute CAT-1-Modem verzichtet auf diese Technologie. Des Weiteren wäre es im Sinne der Redundanz möglich, ein LTE und ein 5G Modem parallel zu betreiben. Kommt es in einem Netz zu Überlastungen, könnte dann auf das andere gewechselt werden.

8.2 Chancen der Implementierung von 5G

Die Evaluierung der Übertragungsstabilität hat gezeigt, dass die Kapazitäten von LTE-CAT-1 in einer belasteten Funkzelle nicht ausreichen und Störungen in Bereichen mit einer hohen Gerätedichte auftreten. Auch die Gesamtlatenz unter der Nutzung dieses Standards bewegte sich an der Grenze des Brauchbaren. Wie bereits in Kapitel 3.3.4 erläutert, wurden mit der Entwicklung des 5G-Standards genau diese Probleme adressiert. Zum einen wird mit Massive Machine Type Communications (mMTC) an einer Lösung für hohe Gerätedichten gearbeitet und mit Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) sollen niedrigste Latenzzeiten

ermöglicht werden. Mit dieser Aussicht auf einen verbesserten Quality of Service sollte 5G in der zukünftigen Weiterentwicklung des Empfängers berücksichtigt werden.

Vielversprechend für den Einsatz im System ist ebenfalls das 5G-Network-Slicing. Ein Veranstalter könnte sich für die Dauer des Events einen Slice buchen und hätte damit fest zugesicherte Kapazitäten in der Luftschnittstelle und im Kernnetz. Dies könnte den QoS so maßgeblich verbessern, dass sich das System für den musiksynchronen Bühneneinsatz auf einer Großveranstaltung eignet.

Die Implementierung von 5G ist zu diesem Zeitpunkt noch mit hohen Kosten verbunden. Die Preise der Module im Hardware-Bereich liegen Stand April 2026 durchschnittlich noch bei über 200 € [61], [62]. Ein Angebot der Telekom für die Nutzung eines Video-Broadcast-Slices mit einer Mindest-Bandbreite von 8 Mbit/s schlägt mit einem Preis von 50 € für eine 15-minütige Nutzungsdauer zu Buche [39]. Da diese hohe Bandbreite für die Übertragung von Art-Net-Paketen nicht erforderlich ist, müsste ein passendes Angebot für diesen Use-Case gefunden werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lokales Produktionsszenario	9
Abbildung 2: Remote Produktionsszenario	9
Abbildung 3: Skaliertes Remoteproduktions-Szenario	10
Abbildung 4: Entwurf des Gesamtsystems, bestehend aus Sendeinstanz, Vermittlungsinstanz und Hardware-Prototyp	11
Abbildung 5: Die Bewertung der Ton- zu Videoverzögerung anhand von Schulnoten [6, S. 532].....	12
Abbildung 7: 5-Pol-DMX Anschluss [9, S. 13].	15
Abbildung 6: 3-Pol-DMX Anschluss [9, S. 13].	15
Abbildung 8: Schematischer Ablauf einer DMX512 Kanalübertragung [7, S. 5].....	16
Abbildung 9: Der Aufbau des ArtDmx-Pakets im Byte-Raster.	18
Abbildung 10: Ein exemplarisches Lichtsystem aus Lichtpult, Node, Dimmer und Scheinwerfern[11], [12], [13], [14], [15], [16].	19
Abbildung 11: Der Vergleich zwischen den Netzwerk-Referenzmodellen mit Beispielen [17]	21
Abbildung 12: Eine Darstellung von einfachen NAT mit einer öffentlichen IP-Adresse für jeden Router [20].	24
Abbildung 13: Die Darstellung von CGNAT mit der öffentlichen IP-Adresse des ISPs [20].	25
Abbildung 14: Der Aufbau eines UDP-Header [21, S. 212] Fig. 6.5.....	26
Abbildung 15: Die Rechnerkommunikation anhand von Sockets [21, S. 213] Fig. 6.6. ..	28
Abbildung 16: LTE-Gesamtsystem im Überblick [28, S. 3] Fig. 1.1.	35
Abbildung 17: Die Anwendungsszenarien der ITU mit konkreten Beispielen [33, S. 111] Fig. 4.1.....	38
Abbildung 18: Das 5G-Standalone Netz im Überblick [28, S. 177] Fig. 2.19.	39
Abbildung 19: Beamforming durch Massive MIMO [34].	40
Abbildung 20: Die Umsetzung von Network Slicing im Kernnetz [33, S. 236] Fig. 9.18. ...	41
Abbildung 21: Die Download- und Uploadraten in Mbit/s erhoben von Opensignal [36].43	
Abbildung 22: Der Aufbau einer SPI-Verbindung [39, S. 221] Fig. 8.2.	44
Abbildung 23: Der Aufbau einer UART-Verbindung [39, S. 196] Fig. 7.1.	45
Abbildung 24: Eine Skizzierung der Kommunikationsstrategie.	48
Abbildung 25: Die Dauer des Pings an vier Messpositionen mit EDGE.	50
Abbildung 26: Darstellung der Schaltung des Hardware-Prototyps als Blockschaltbild.53	
Abbildung 27: Die erste Verschaltung aller Module auf einem Breadboard.	54
Abbildung 28: Der fertige Prototyp in einem 3D-gedruckten Gehäuse.	55
Abbildung 29: Der Programmcode der im Anhang befindlichen "main.cpp" Datei als UML-Diagramm dargestellt.	55
Abbildung 30: UML-Darstellung der Funktion "bridgeLteToEthernet" aus der Code-Datei "ArtNetBridge.h" im Anhang.	57

Abbildung 31: UML-Diagramm der Funktion "sendLteUdpRegMsg" aus der Code-Datei "ArtNetBridge.h" im Anhang.	58
Abbildung 32: UML-Darstellung der Funktion "writeDMX" aus der Code-Datei "DMXOut.h" im Anhang.	59
Abbildung 33: UML-Dastellung des Programmcodes "Relay.py" im Anhang.....	61
Abbildung 34: Ergebnis des Versuchs zur DMX512 Protokollkonformität: die zwei Scheinwerfer zeigen das erwartete Signal.	64
Abbildung 35: Eine Skizze des Versuchsaufbaus zur Ermittlung der Gesamtlatenz.	65
Abbildung 36: Zeitpunkt der ersten Reaktion auf dem Monitor.....	66
Abbildung 37: Zeitpunkt der Reaktion des Scheinwerfers.....	66
Abbildung 38: Ein Screenshot vom Geländeplan des Hamburger DOMs mit den eingezeichneten Messpositionen und Routen [53].	67
Abbildung 39: Darstellung des prozentualen Paketverlustes über den Zeitraum der jeweiligen gesamt-Messdauer an den beiden Versuchstagen.....	68
Abbildung 40: Die zeitliche Darstellung der am Laptop eintreffenden Paketrage pro Sekunde für die erste stationäre Position.	69
Abbildung 41: Ein Screenshot der Karte von www.cellmapper.net mit den Filtereinstellungen: Telekom.de, 4G-LTE.....	69
Abbildung 42: Die zeitliche Darstellung der am Laptop eintreffenden Paketrage pro Sekunde für die zweite bewegte Messung.....	70
Abbildung 43: Die zeitliche Darstellung der am Laptop eintreffenden Paketrage pro Sekunde für die dritte stationäre Position.	70
Abbildung 44: Die RTTs der Messpositionen unmittelbar vor jeder Messung.	71

Literaturverzeichnis

- [1] „Eurolite QuickDMX Wireless transmitter“, Musikhaus Thomann. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thomann.de/de/eurolite_quickdmx_wireless_transmitter.htm
- [2] „Chauvet DJ D-Fi XLR TX“, Musikhaus Thomann. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thomann.de/de/chauvet_dj_d-fi_xlr_tx.htm
- [3] Thomann, „Eurolite Quick DMX Receiver“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thomann.de/de/eurolite_quickdmx_wireless_receiver.htm
- [4] Thomann, „Chauvet DJ D-Fi RX“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thomann.de/de/chauvet_dj_d-fi_xlr_rx.htm
- [5] „Stardust“, LumenRadio. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://lumenradio.com/products/stardust/>
- [6] „Lumenradio CRMX Stardust“, Musikhaus Thomann. Zugriffen: 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thomann.de/de/lumenradio_crmx_stardust.htm
- [7] „WLAN Broschüre der Bundesnetzagentur“. März 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/_DL/WLAN.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [8] K. Beuth, S. Breide, C. F. Lüders, G. Kurz, und R. Hanebuth, *Nachrichtentechnik*, Bd. 5. Würzburg: Vogel Fachbuch, 2024.
- [9] B. L. Heide und H.-J. Maempel, „Die Wahrnehmung audiovisueller Synchronität in elektronischen Medien“, in 26. *Tonmeistertagung*, VDT, 2010. [Online]. Verfügbar unter: https://www.simpk.de/fileadmin/user_upload_sim/Dokumente/Forschung/Themen/Abteilung_III/Publikationen/Heide_Maempel_2011_Die_Wahrnehmung_audiovisueller_Synchronitaet_in_elektronischen_Medien.pdf
- [10] „ANSI E1.11-2024“. Zugriffen: 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://webstore.ansi.org/standards/esta/ansie1112024>
- [11] „DIN_56930-2“. 2000. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nautos.de/W7l/search/item-detail/DE45750352>
- [12] J. Mueller, *Handbuch der Lichttechnik*, 4. Aufl. Bergkirchen: PPV Medien, 2008.
- [13] ELATION, „ELATION DMX 101“. USA, 22. Januar 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.elationlighting.com/cdn/shop/files/ELATION_-_DMX_101_HANDBOOK.pdf?v=16962111054650623906
- [14] „Art-Net Spezifikationen“. 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://art-net.org.uk/downloads/art-net.pdf>
- [15] „Botex MPX-405 Dimmer“, Musikhaus Thomann. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thomann.de/de/botex_mpx405v.htm
- [16] „Swisson XND-4B5 Ethernet Node (Box)“, Musikhaus Thomann. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thomann.de/de/swisson_xnd_4b5_ethernet_node_box.htm
- [17] „Stufenlinse“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dj-checkpoint.de/images/product_images/original_images/155105_side1.jpg
- [18] „Robe iPAINTE“, ROBE Lighting. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.robelighting.de/ipainte>
- [19] „Expolite TourLED – Blue Sound“. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://blue-sound.de/produkt/expolite-tourled-42-cm/>

- [20] „MA Lighting grandMA3 light“. Zugegriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.prolighting.de/de/lichttechnik/lichtsteuerungen-dimmer/dmx-controller/ma-lighting-grandma3-light.html>
- [21] „TCP/IP Modell“. [Online]. Verfügbar unter: https://blog.assets.studyflix.de/wp-content/uploads/2022/11/TCP_IP_WP-Bilder_Vergleich-1024x576.jpg
- [22] C. Meinel und H. Sack, *Internetworking: Technische Grundlagen und Anwendungen*. in X.media.press. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. doi: 10.1007/978-3-540-92940-6.
- [23] N. Feamster, A. Tanenbaum, und D. Wetherall, *Computernetzwerke*, 6. Aufl. Pearson, 2024.
- [24] M. Spalter, „What is Carrier Grade NAT (CGNAT) ?“, draytek.co.uk. Zugegriffen: 29. Januar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.draytek.co.uk/information/blog/what-is-cgnat>
- [25] H. 1964- Zisler, *Computer-Netzwerke Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendung*, 7. Aufl. Bonn: Rheinwerk Verlag, 2022.
- [26] „Iana Internet Assigning Numbers Authority“, Service Name and Transport Protocol Port Number Registry. Zugegriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iana.org/assignments/service-names-port-numbers/service-names-port-numbers.xhtml?search=6454>
- [27] M. Goodwin, „Was versteht man unter Latenz? | IBM“. Zugegriffen: 3. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ibm.com/de-de/think/topics/latency>
- [28] „Bundesnetzagentur - 2G Abschaltung“. Zugegriffen: 4. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Breitband/2GAbschaltung/start.html>
- [29] ITU, „ITU Quality of service regulation manual“. 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB.QOS_REG01-2017-PDF-E.pdf
- [30] Umlaut, „Realisierungsoptionen einer angemessenen Versorgung über Mobilfunk im Kontext des novellierten Universaldienstes“. Bundesnetzagentur, Aachen, 2022 30 n. Chr. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Grundversorgung/Gutachten_umlaut_WIK_Mobilfunk.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [31] M. Sauter, *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: 5G New Radio und Kernnetz, LTE-Advanced Pro, GSM, Wireless LAN und Bluetooth*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-36963-7.
- [32] „Europe’s legacy networks: 3G and 2G still matter in the age of 5G | Opensignal“, Opensignal. Zugegriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://insights.opensignal.com/2024/12/12/europes-legacy-networks-3g-and-2g-still-matter-in-the-age-of-5g>
- [33] 3GPP, „Specification # 22.011“, 3gpp.org. Zugegriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=566>
- [34] 3GPP, „ETSI TS 123 067“. 2005. [Online]. Verfügbar unter: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123000_123099/123067/06.01.00_60/ts_123067v060100p.pdf

- [35] „Alle LTE Kategorien (CAT1 - CAT21) im Vergleich“, lte-anbieter.info. Zugriffen: 27. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/technik/kategorien-und-3gpp-release.php>
- [36] „LTE Anbieter im Vergleich & Übersicht“, lte-anbieter.info. Zugriffen: 5. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lte-anbieter.info/lte-provider/lte-anbieter-uebersicht.php>
- [37] U. Trick, *5G Die Mobilfunknetze der 5. Generation*, 2. Aufl. De Gruyter, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9783111186627/html>
- [38] Samsung, „Massive MIMO Bild“, Samsung Global Newsroom. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://news.samsung.com/global/samsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper>
- [39] „Telekom Broadcast Slice“. 29. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.telekom.de/agb/downloads/54314.pdf>
- [40] Opensignal, „Opensignal Download und Upload Speed Grafik“. Zugriffen: 27. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://insights.opensignal.com/2022/06/22/our-users-in-dach-markets-enjoy-a-superior-mobile-network-experience-on-5g-than-on-4g>
- [41] „Telekom Magentamobil M“. 1. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.telekom.de/produktinformationsblatt/magentamobil-m.pdf>
- [42] „Vodafone Gigamobil M“. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/media/downloads/pdf/VF-gigamobil-M-dezember-2025.pdf>
- [43] A. Meroth und P. Sora, *Sensornetzwerke in Theorie und Praxis: Embedded Systems-Projekte erfolgreich realisieren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021. doi: 10.1007/978-3-658-31709-6.
- [44] T. Daden, „AT-Befehle | muggothek.de“, Muggothek. Zugriffen: 11. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://muggothek.de/retro-computing/at-befehle/>
- [45] Simcom, „Simcom A76XX Series_AT_Command_Manual_V1.06“. Shanghai, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.simcom.com/product/A7600C-L1.html?utm_source=everythingRF
- [46] Simcom, „Simcom A76XX Series_TCPIP_Application Note_V1.02“. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.simcom.com/product/A7600C-L1.html?utm_source=everythingRF
- [47] „Was ist ein Relay-Server - Cybersecurity-Begriffe und Definitionen“, vpnunlimited. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vpnunlimited.com/de/help/cybersecurity/relay-server>
- [48] „ESP-32 Dev Kit C V4“, AZ-Delivery. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.az-delivery.de/products/esp-32-dev-kit-c-v4>
- [49] AZ-Delivery, „ESP32_DevKitC_v4 Datenblatt“. Berlin. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn.shopify.com/s/files/1/1509/1638/files/ESP-32_DevKit_C_V4_Datenblatt_AZ-Delivery_Vertriebs_GmbH_24ec770f-c65e-4bd3-92c9-cd64b4d070b8.pdf?v=1615364587
- [50] Waveshare, „A7670E LTE Cat-1 HAT For Raspberry Pi, Multi Band Support, 2G GSM / GPRS, LBS Positioning“. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.waveshare.com/a7670e-cat-1-hat.htm>

- [51] AZ-Delivery, „W5500 Ethernet Netzwerk Internet Modul“, AZ-Delivery. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.az-delivery.de/products/w5500-ethernet-netzwerk-internet-modul-fuer-arduino>
- [52] „MAX485 Module TTL“, Eckstein. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://eckstein-shop.de/MAX485ModuleTTLSwitchSchaltertoRS-485ModuleRS4855VModul>
- [53] I. Smalley und S. Susnjara, „Was ist ein Virtual Private Server (VPS)? | IBM“. Zugriffen: 14. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ibm.com/de-de/think/topics/vps>
- [54] 1&1, „1&1 DSL 50“. Montabaur, 22. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://content.1und1.de/pib/BB_VDSL_50_MVL_20240201.pdf
- [55] Telekom, „Telekom Prepaid M“. Bonn, 21. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.telekom.de/produktinformationsblatt/magentamobil-prepaid-m.pdf>
- [56] Iiyama, „ProLite XUB3493WQSU-B1“, iiyama.com. Zugriffen: 20. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://iiyama.com/de_de/produkte/prolite-xub3493wqsu-b1/
- [57] S. Schäfer, „Dom-Macher sind glücklich über Besucherzahlen“, *MOPO*, 19. April 2026. Zugriffen: 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mopo.de/hamburg/dom-macher-sind-gluecklich-ueber-besucherzahlen-obwohl/>
- [58] Hamburg.de, „Hamburger DOM interaktive Karte“. Hamburg, 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/freizeit/dom/interaktive-dom-karte>
- [59] „Strato VPS-Server Angebote“, STRATO GmbH. Zugriffen: 28. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.strato.de/server/linux-vserver/>
- [60] „Prepaid-Tarife ohne Vertragsbindung | Telekom“, Telekom Deutschland GmbH. Zugriffen: 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.telekom.de/shop/tarife/magenta-mobil-prepaid>
- [61] „SIM82XX-M2 5G HAT“, Waveshare. Zugriffen: 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.waveshare.com/sim8202g-m2-5g-hat-b.htm?sku=23253>
- [62] „Waveshare SIM8262E-M2 5G HAT“, Eckstein. Zugriffen: 29. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://eckstein-shop.de/waveshare-sim8262e-m2-5g-hat-raspberry-pi-5-pcie-modul>

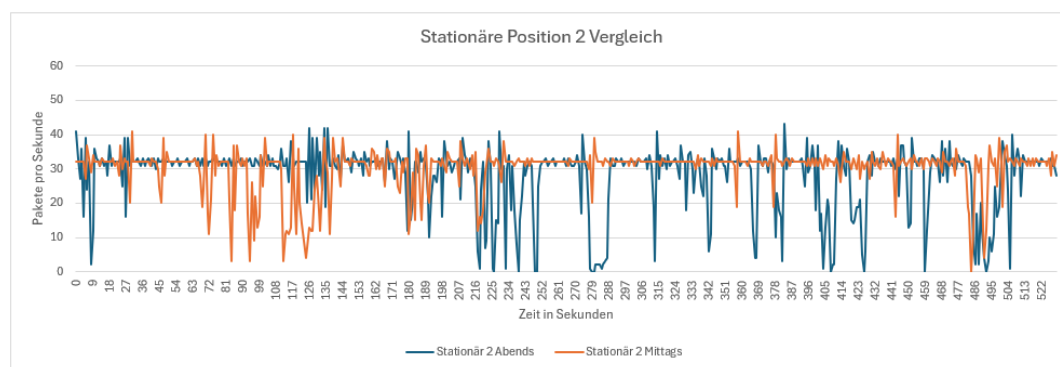
Anhang

Messergebnisse:

Stationäre Position 1:

Daten	17.04.2026	18.04.2026
Uhrzeit	21:35	15:19
Publikumsdichte	2	0,5
Ping [ms]	54	56
Empfangene Pakete	5666	16191
Verlust %	67,6	7,4

Stationäre Position 2:

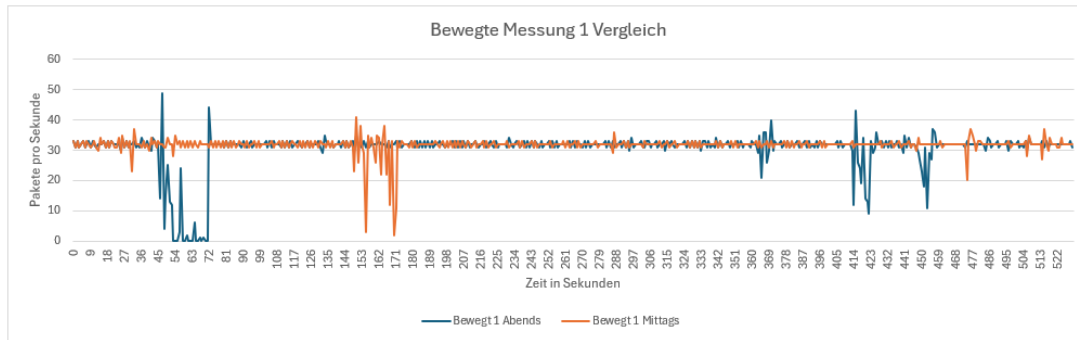


Daten	17.04.2026	18.04.2026
Uhrzeit	22:08	16:05
Publikumsdichte	1,3	0,5
Ping [ms]	77	66
Empfangene Pakete	14898	16036
Verlust %	14,8	8,3

Stationäre Position 3:

Daten	17.04.2026	18.04.2026
Uhrzeit	22:39	16:36
Publikumsdichte	0,5	0,3
Ping [ms]	55	53
Empfangene Pakete	16986	16825
Verlust %	2,9	3,8

Bewegte Messung 1:

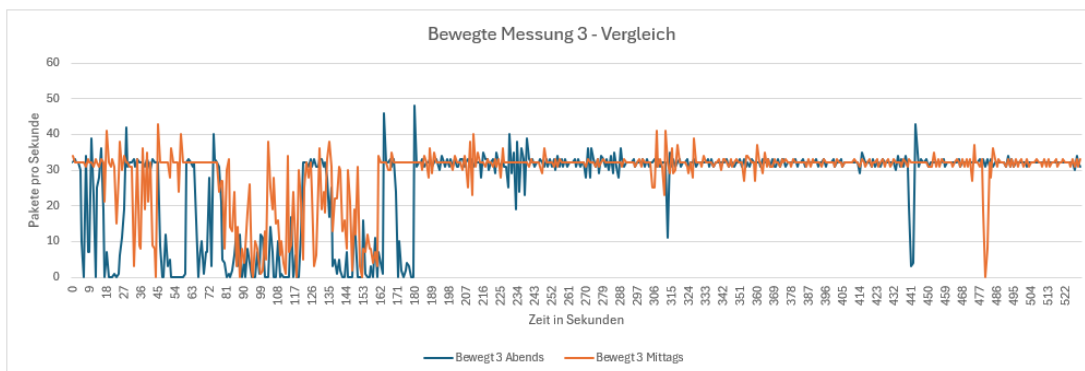


Daten	17.04.2026	18.04.2026
Uhrzeit	21:25	15:35
Publikumsdichte	0,5 bis 2	0.5
Ping [ms]	58	56
Empfangene Pakete	16187	16872
Verlust %	7,4	3,5

Bewegte Messung 2:

Daten	17.04.2026	18.04.2026
Uhrzeit	21:51	15:50
Publikumsdichte	2 bis 1,5	0,5 bis 1
Ping [ms]	56	52
Empfangene Pakete	13462	16323
Verlust %	23,0	6,7

Bewegte Messung 3:



Daten	17.04.2026	18.04.2026
Uhrzeit	22:23	16:20
Publikumsdichte	2 bis 1,3	0,5
Ping [ms]	76	68
Empfangene Pakete	13592	15365
Verlust %	22,3	12,1

Verwendete Programme und Hilfsmittel

Programm	Funktion	Version
Resolume Arena	Erzeugung von Art-Net-Paketen	7.23
DMX-Workshop	Erzeugung von Art-Net-Paketen	7.35
Github Copilot Free (Unterstützend)	Gibt Vorschläge und Korrekturen bei der Erstellung des Programmcodes in dem jeweiligen Code-Editor an (KI-Basiert).	0.45.1
Umlet	Tool zum Erstellen von UML-Diagrammen	14.2
Draw.io	Webanwendung zur Erstellung von Systemdiagrammen ect.	-
Wireshark	Tool zur Netzwerkanalyse	4.6.0

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

„Entwicklung und Evaluierung eines Systems zur Fernsteuerung von Art-Net- und DMX-Endgeräten über das Mobilfunknetz“

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Datum

Unterschrift