



WHZ Fakultät
Elektrotechnik

DIPLOMARBEIT

zu dem Thema

Konzeption und Realisierung eines Referenzaufbaus zur analogen Videosignalübertragung über eine Funkstrecke zwischen einer Kamera- und Rechneinheit

zur Erlangung des
Akademischen Grades

Diplom-Ingenieur für Elektrotechnik (FH)

eingereicht von:

Lau, Elias

geb. am 17.05.2002

Hochschullehrer:

Prof. Dr.-Ing. Rigo Herold

Auftraggeber:

Westfälische Hochschule Zwickau



Aufgabenstellung für die schriftliche Diplomarbeit

Matrikel-Nr.: 42492 Datum: 29.09.2025
Name: Lau Vorname: Elias
Seminargruppen-Nr.: 212048/AUT geb. am: 17.05.2002
Studiengang: Elektrotechnik/Automatisierungstechnik (D)

Thema:

Konzeption und Realisierung eines Referenzaufbaus zur analogen Videosignalübertragung per Funk zwischen Datenbrille und Rechnereinheit

(ausführliche Aufgabenstellung auf der Rückseite)

Die wissenschaftliche Arbeit ist als Einzelarbeit anzufertigen.

Betreuer der Arbeit: Prof. Dr.-Ing. Rigo Herold
(Akademischer Grad und Name)

Zweitgutachter:
(Akademischer Grad und Name)

Tag der Ausgabe: **21. OKT. 2025**

Abgabetermin: **10. MRZ. 2026**

Tag der Abgabe:



**WHZ Westsächsische
Hochschule Zwickau**
Fakultät Elektrotechnik
Prüfungsausschuss

S. Schwab
Vorsitz Prüfungsausschuss

Postanschrift:
PF 20 10 37
08012 Zwickau

Hausanschrift:
Kornmarkt 1
08056 Zwickau

Lu
Hochschullehrer

Sperrvermerk (max. 3 Jahre) bis:

Ausführliche Aufgabenstellung:

Projekthintergrund:

Ein aktueller Einsatz von Datenbrillen ist die Videoübertragung zu einem Rechner um Videodaten zu streamen. Für weitere Entfernungen ist Wifi oft nicht geeignet und es ist eine analoge Übertragung erforderlich. Ein älterer analoger Standard ist die analoge Videoübertragung. Genannt Composite Video und wird oft zusammen mit Cinch als Stecker genutzt. Ebenfalls lässt sich dieses Signal per Funk übertragen. Aktuelle Einsätze sind Drohnen.

Projektziel:

Im Rahmen der Arbeit soll überprüft werden, wie ein analoges Signal einer Kamera per Funk zu einen Empfänger übertragen werden kann und anschließend z.B. per USB wie eine Webcam am Rechner erkannt werden kann. Konkret soll geprüft werden, welche verfügbaren Bauteile (ICs, analoge Komponenten, Mikrocontroller, FPGAs) genutzt werden können, um dieses analoge Übertragen zu ermöglichen.

Bestandteile der Arbeit:

- Recherche verschiedener Spezifikationen zur analogen Videoübertragung
- Konzeption einer Schaltung mit verfügbaren Bauelementen
- Realisierung einer Laborschaltung
- Test und Evaluation

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	VI
Verzeichnis der Tabellen	VIII
Abkürzungen	IX
Formelzeichen	XII
Vorwort	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Zielstellung	2
2 Theoretischer Hintergrund	3
2.1 Composite Video Baseband Signal	3
2.1.1 Aufbau	3
2.1.2 Phase Alternating Line	5
2.1.3 CCIR- bzw. ITU-R-Norm B, G	6
2.2 Analoge Funkübertragung von Videosignalen	7
2.2.1 Prinzip der Übertragung	7
2.2.2 Eigenschaften der HF-Übertragung im GHz-Bereich	8
2.2.3 Antennentechnik	11
2.2.4 Gesetzliche Rahmenbedingungen in Deutschland	13
2.3 Digitalisierung analoger Videosignale	15
2.3.1 Signalaufbereitung	15
2.3.2 Analog-Digital-Wandlung	15
2.3.3 Anforderungen an die Abtastfrequenz	16
2.3.4 Digitale Repräsentation der Bilddaten	17
2.3.5 Implementierung in Video-Decoder-ICs	18

2.4	Mobile Industry Processor Interface.....	19
2.4.1	Funktionsprinzip.....	19
2.4.2	Architektur.....	19
2.4.3	Protokollstandards.....	21
2.4.4	Physische Schnittstellen.....	21
2.5	Universal Serial Bus.....	23
2.5.1	Funktionsweise.....	23
2.5.2	Geräteklassen.....	24
2.5.3	USB Video Class.....	24
2.5.4	On-The-Go.....	25
2.5.5	Steckertypen.....	25
2.5.6	Stromversorgung.....	27
3	Methodik.....	28
3.1	V-Modell.....	28
3.2	Anwendung des V-Modells auf die Entwicklung des Referenzaufbaus.....	29
4	Anforderungsanalyse.....	31
4.1	Systemübersicht.....	31
4.2	Systemabgrenzung.....	31
4.3	Anspruchsgruppen.....	32
4.4	Randbedingungen.....	32
4.5	Anforderungen.....	33
4.5.1	Funktionale Anforderungen.....	33
4.5.2	Nicht-funktionale Anforderungen.....	33
4.5.3	Systemanforderungen.....	34
4.6	Verifikationsmethoden.....	35
4.6.1	Funktionale Tests.....	35
4.6.2	Analyse der Systemauslegung.....	36
4.6.3	Analyse der Implementierung.....	36
4.6.4	Analyse des Übertragungsverhaltens.....	36

4.7	Offene Punkte und Annahmen	37
5	Systementwurf	38
5.1	Ableitung der Systemarchitektur aus den Anforderungen	38
5.2	Herleitung der Systemarchitektur anhand von Referenzsystemen.....	39
5.3	Systemarchitektur des Gesamtsystems	39
5.4	Beschreibung der Subsysteme	40
5.4.1	Kameraeinheit.....	40
5.4.2	Sende- und Empfangseinheit.....	40
5.4.3	Funkübertragungsstrecke	41
5.4.4	Video-Digitalisierungseinheit.....	41
5.4.5	Schnittstelle zum Rechner	41
5.5	Annahmen für fehlende Systemparameter.....	41
5.5.1	ISM-Frequenzband	41
5.5.2	Erforderliche Übertragungreichweite	44
5.6	Festlegung der Systemparameter	45
6	Detailentwurf	47
6.1	Kameraeinheit.....	47
6.2	Sendeeinheit	48
6.3	Antennen.....	49
6.3.1	Verbindung zur Sendeeinheit.....	50
6.4	Empfangseinheit	52
6.5	Video-Digitalisierungseinheit.....	53
6.5.1	Variante A: Digitalisierung mittels USB-Videokonverter	53
6.5.2	Variante B: Digitalisierung mittels Video-Decoder und Einplatinencomputer	54
6.6	Spannungsversorgung	55
6.7	Reichweitenabschätzung der Funkstrecke.....	57
6.8	Ergänzende Komponenten zur Systemintegration	58

6.9	Schaltungsentwurf.....	58
6.9.1	Schaltungsentwurf der Senderseite	59
6.9.2	Schaltungsentwurf der Empfängerseite – Variante A.....	60
6.9.3	Schaltungsentwurf der Empfängerseite – Variante B.....	62
6.9.4	Zusammenfassung.....	63
7	Implementierung.....	64
7.1	Umsetzung der Senderseite.....	64
7.2	Umsetzung der Empfängerseite.....	65
7.2.1	Grundaufbau	65
7.2.2	Variante A: Digitalisierung mittels USB-Videokonverter	66
7.2.3	Variante B: Digitalisierung mittels Video-Decoder und Einplatinencomputer	67
7.3	Konfiguration der Systemkomponenten	67
7.4	Verwendete Software.....	68
7.5	Mechanische Umsetzung.....	69
7.6	Herausforderungen und Abweichungen bei der Umsetzung	70
7.7	Darstellung des realisierten Referenzaufbau	71
8	Verifikation	73
8.1	Funktionstests	73
8.1.1	Kamera	73
8.1.2	Funkstrecke.....	78
8.1.3	Digitalisierungseinheit Variante A.....	80
8.1.4	Digitalisierungseinheit Variante B.....	82
8.1.5	Spannungsversorgung	82
8.1.6	Verarbeitung eines CVBS	83
8.2	Analyse der Systemauslegung.....	84
8.3	Analyse der Implementierung.....	85
8.4	Feldversuche.....	86
8.4.1	Versuchsaufbau und Durchführung.....	86

8.4.2	Freisichtbedingungen (LOS)	87
8.4.3	Innerhalb eines Gebäudes	89
8.5	Analyse des Übertragungsverhaltens	90
8.5.1	Vergleich der theoretischen und gemessenen Maximalreichweite	92
8.6	Zusammenfassung.....	93
9	Fazit und Ausblick	96
10	Zusammenfassung	98
	Quellenverzeichnis	XV
	Verzeichnis des Anhangs.....	XXIV
	Anhang	A

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1 Zeilenoszillogramm des CVBS für die Normfarbbalkenfolge, Farbsättigung 100%, mit reduzierten Farbdifferenzsignalen [8, S. 65]	5
Abbildung 2 Darstellung einer Frequenzmodulation [7, S. 220].....	8
Abbildung 3 Schematischer Signalfluss eine Funkübertragungsstrecke nach [11, S. 23, 14].....	8
Abbildung 4 Ausbreitungsmechanismen von elektromagnetischen Wellen [7, S. 196]	9
Abbildung 5 Quasi-Optische Sichtverbindung [11, S. 87].....	10
Abbildung 6 Lineare Polarisation [11, S. 158].....	11
Abbildung 7 Zirkulare Polarisation [11, S. 158].....	12
Abbildung 8 Artefakte nahe der Nyquist-Frequenz [26, S. 57].....	17
Abbildung 9 Darstellung des Chroma-Subsampling der verschiedenen Format [27].	18
Abbildung 10 Architektur von MIPI nach OSI-Referenzmodell [29]	20
Abbildung 11 CSI Interface mit D-PHY-Verbindung [32, S. 2]	22
Abbildung 12 CSI Interface mit D-PHY-Verbindung [32, S. 2]	22
Abbildung 13 Topologie eines USB-Systems [34, S. 16].....	23
Abbildung 14 USB 2.0 Typ-A und Typ-B Stecker nach [37–39].....	26
Abbildung 15 USB 2.0 Mini-A/-B und Micro-A/-B Stecker nach [39–43]	27
Abbildung 16 Grundstruktur des V-Modell nach [48, 434 ff.]	28
Abbildung 17 Darstellung der Systemarchitektur nach [50, 51]	39
Abbildung 18 Schaltplan für die Senderseite	59
Abbildung 19 Schaltplan für die Empfängerseite - Variante A	60
Abbildung 20 Schaltplan für die Empfängerseite - Variante B	62
Abbildung 21 Referenzaufbau Senderseite	71
Abbildung 22 Referenzaufbau Empfängerseite nach Variante A.....	72
Abbildung 23 Nahaufnahme der Verdrahtung der Kamera.....	74
Abbildung 24 Cinch-Stecker mit Schraubanschluss an Composite Video Anschluss eines Fernsehers	74
Abbildung 25 Spannungsmessung des Labornetzgerätes mit einem Digitalmultimeter	75
Abbildung 26 Ausgabe des CVBS auf einem Fernseher	75
Abbildung 27 Abschlusswiderstand bei der Messung des CVBS der Kamera.....	76
Abbildung 28 Oszillogramm einer Bildzeile des CVBS der Kamera, mit Messung der Bildzeilendauer	76

Abbildung 29 Oszillogramm einer Bildzeile des CVBS der Kamera, mit Messung der sichtbaren Bildzeilendauer.....	77
Abbildung 30 Vergleich der Farbträgerbursts zwei aufeinanderfolgender Bildzeilen .	77
Abbildung 31 Versuchsaufbau zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Funkverbindung auf der Senderseite.....	79
Abbildung 32 Versuchsaufbau zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Funkverbindung auf der Empfängerseite.....	79
Abbildung 33 Ausgabe des per Analogfunk übertragenen CVBS auf einem Fernseher	80
Abbildung 34 Versuchsaufbau zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Digitalisierungseinheit DFG/USB2pro.....	81
Abbildung 35 Wiedergabe des digitalisierten CVBS unter Verwendung des Programms VLC Media Players.....	81
Abbildung 36 Versuchsaufbau zur Messung der USB-Spannungsversorgung.....	82
Abbildung 37 Versuchsaufbau zur Messung der 12V-Spannungsversorgung.....	83
Abbildung 38 Positionierung der Empfängerseite nach Variante A bei dem Feldversuch unter Freisichtbedingungen.....	88
Abbildung 39 Positionierung der Senderseite bei dem Feldversuch unter Freisichtbedingungen	88

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1 Basiswerte der CCIR- bzw. ITU-R-Norm B, G nach [6, S. 13, 7, S. 324].....	6
Tabelle 2 Vergleich von Linearer und Zirkularer Polarisierung nach [7, 11, 17].....	13
Tabelle 3 Elektrische Parameter verschiedener USB-Standards nach [34, S. 377, 44]	27
Tabelle 4 Funktionale Anforderungen.....	33
Tabelle 5 Nichtfunktionelle Anforderungen.....	34
Tabelle 6 Systemanforderungen.....	35
Tabelle 7 ISM-Bänder laut Frequenzplan der BNetzA für Bildsignalübertragung nach [18].....	42
Tabelle 8 Freiraumdämpfung bei den ISM-Bänder für Bildsignalübertragung bei einer Entfernung von 50 m	42
Tabelle 9 Vergleich zwischen dem 2,4-GHz- und dem 5,8-GHz-Bereich	43
Tabelle 10 Systemparameter gemäß dem Systementwurf.....	46
Tabelle 11 Spezifikationen der Foxeer T-Rex Micro nach [55]	47
Tabelle 12 Spezifikationen des TBS Unify Pro32 Nano nach [57, 58]	48
Tabelle 13 Spezifikation der TBS Triumph Pro nach [59]	49
Tabelle 14 Spezifikationen des CAB.01036 [60, 61].....	50
Tabelle 15 Spezifikationen des RC832 Mini nach [63–65]	52
Tabelle 16 Spezifikationen des DFG/USB2pro nach [66]	53
Tabelle 17 Spezifikationen des EVAL-ADV7282AMEBZ nach [67–70]	54
Tabelle 18 Spezifikationen des Raspberry Pi Zero 2 W nach [71].....	55
Tabelle 19 Spezifikationen des XL6019 nach [73, 74].....	56
Tabelle 20 Zusammenfassende Bewertung der Anforderungen (+: Anforderung vollständig erfüllt; 0: Anforderung teilweise erfüllt; -: Anforderung nicht erfüllt).....	94

Abkürzungen

Abkürzung	Begriff	Erläuterung
ADC	Analog-Digital-Converter	Analog-Digital-Wandler
BNetzA	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen	
CCIR	Comité Consultatif International des Radiocommunications	Internationaler Ausschuss für Funkwesen
C-PHY	Compact Physical	Kompakte physische Schnittstelle
CSI	Camera Serial Interface	Serielle Kameraschnittstelle
CVBS	Composite Video Baseband Signal	Englischer Fachbegriff für FBAS
D-PHY	Differential Physical	Differenzielle physische Schnittstelle
DSI	Display Serial Interface	Serielle Bildschirmschnittstelle
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power	Äquivalente Isotrope Strahlungsleistung
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
FA	Funktionale Anforderungen	
FM	Frequenzmodulation	
FPV	First-Person-View	Sicht aus Ich-Perspektive
FSPL	Free Space Path Loss	Freiraumdämpfung
GAB	Gregorius-Agricola-Bau	Gebäudekomplex der WHZ
HF	Hochfrequenz	
H-Impuls	Horizontaler Synchronimpuls	

Abkürzung	Begriff	Erläuterung
I2C	Inter-Integrated Circuit	Bussystem zwischen Integrierten Schaltkreisen
IC	Integrated Circuit	Integrierter Schaltkreis
IoT	Internet of Things	Internet der Dinge
ISM-Bänder	Industrial, Scientific and Medical Band	Hochfrequenzbereiche für Industrie, Wissenschaft und Medizin
ITU	International Telecommunication Union	Internationale Fernmeldeunion
LHCP	Left-Handed Circular Polarisation	Linksdrehende zirkulare Polarisation
LOS	Line-Of-Sight Propagation	Quasi-Optische Sichtverbindung
MIPI	Mobile Industry Processor Interface	Schnittstellenstandard für Mobilgeräte
NF	Niederfrequenz	
NFA	Nicht-Funktionale Anforderungen	
NTSC	National Television System Committee	Amerikanischer analoger Farbfernsehstandard
OSD	On-Screen Display	Telemetriedaten im aktiven Bild
OSI	Open Systems Interconnection	Kommunikation offener Systeme
OTG	On-The-Go	USB-Funktion zur Kommunikation zwischen zwei Hosts
PAL	Phase Alternating Line	Phasenumkehr je Zeile
PKB	Paul-Kirchhoff-Bau	Gebäudekomplex der WHZ
QAM	Quadratur-Amplituden-Modulation	
RHCP	Right-Handed Circular Polarisation	Rechtsdrehende zirkulare Polarisation

Abkürzung	Begriff	Erläuterung
SA	Systemanforderungen	
SECAM	Séquentiel couleur à mémoire	Sequenzielle Farbspeicherung
SoC	System on a Chip	Ein-Chip-System
USB	Universal Serial Bus	Universeller Serieller Bus
UVC	USB Video Class	Video Geräteklasse des USB- Standards
V-Impuls- block	Vertikaler Synchronimpulsblock	
VRX	Video-Receiver	Video-Empfänger
VTX	Video-Transmitter	Video-Sender
WHZ	Westsächsische Hochschule Zwickau	

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
c	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit (in dieser Arbeit in Luft, also 299711000 m/s)
d	[m]	Reichweite einer terrestrischen Funkstrecke unter Einbeziehung der FSPL
$d_{2,4\text{ GHz}}$	[m]	Reichweite einer terrestrischen Funkstrecke im 2,4 GHz-Bereich
$d_{5,8\text{ GHz}}$	[m]	Reichweite einer terrestrischen Funkstrecke im 5,8 GHz-Bereich
d_{MAX}	[m]	Maximale Theoretische Reichweite einer terrestrischen Funkstrecke
E	[Vm ⁻¹]	Elektrisches Feld
$EIRP$	[dBm]	Äquivalente Isotrope Strahlungsleistung
f	[Hz]	Frequenz
$G_{5\text{ GHz}}$	[dB]	Dämpfung eines Koaxialkabels bei 5 GHz
$G_{5,2\text{ GHz}}$	[dB]	Dämpfung eines Koaxialkabels bei 5,2 GHz
$G_{5,7\text{ GHz},250\text{ mm}}$	[dB]	Dämpfung des Koaxialkabels RG178 bei 5,7 GHz
$G_{5,7\text{ GHz}}$	[dB]	Dämpfung eines Koaxialkabels bei 5,7 GHz
$G_{6\text{ GHz}}$	[dB]	Dämpfung eines Koaxialkabels bei 6 GHz
G_E	[dBi]	Gewinn der Empfangsantenne
G_S	[dBi]	Gewinn der Sendeantenne
h_E	[m]	Höhe der Empfangsantenne
h_S	[m]	Höhe der Sendeantenne
I	[A]	Stromstärke
k	[-]	Skalierungsfaktor der Chrominanzkomponente
k_U	[-]	Skalierungsfaktor der U-Komponente
k_V	[-]	Skalierungsfaktor der V-Komponente
L_E	[dBm]	Empfindlichkeitspegel

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
L_F	[dB]	Freiraumdämpfung
$L_{K,real}$	[dB]	Dämpfung des Antennenkabels in der realisierten Variante
L_K	[dB]	Dämpfung des Antennenkabels
L_S	[dBm]	Sendeleistungspegel
l_K	[mm]	Länge eines Koaxialkabels
P	[W]	Elektrische Leistung
t	[s]	Zeit
U	[V]	Spannung
U_B	[V]	Spannung des Blausignals
U_C	[V]	Spannung des Chrominanzsignals
U_{CVBS}	[V]	Spannung des CVBS
U_G	[V]	Spannung des Grünsignals
U_R	[V]	Spannung des Rotsignals
U_{Sync}	[V]	Spannung des Synchronisationssignals
U_U	[V]	Spannung der U-Komponente
U_V	[V]	Spannung der V-Komponente
U_Y	[V]	Spannung des Luminanzsignals
λ	[m]	Wellenlänge

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen meines Studiums der Elektrotechnik und bildet den Abschluss eines prägenden Lebensabschnitts.

Mein besonderer Dank gilt allen Professorinnen und Professoren, die mich während meines Studiums begleitet haben. Durch ihre fachliche Kompetenz und die Fähigkeit, mich immer wieder an meine Grenzen zu bringen, haben sie maßgeblich dazu beigetragen, mein Verständnis für technische Zusammenhänge zu vertiefen und mich fachlich wie persönlich weiterzuentwickeln. Hervorheben möchte ich dabei insbesondere Prof. Dr.-Ing. Rigo Herold, der mich auf die Idee zu dieser Arbeit aufmerksam gemacht und deren Betreuung engagiert übernommen hat.

Ebenso danke ich meinen Kommilitonen für die gemeinsame Studienzzeit. Der gegenseitige Austausch, die Unterstützung bei schwierigen Themen und die verlässliche Zusammenarbeit bei Gruppenarbeiten haben einen wesentlichen Beitrag zum erfolgreichen Verlauf meines Studiums geleistet. Ein besonderer Dank gilt dabei auch der „Termin Lerngruppe ELT.“, aus der sich ein enger Freundeskreis entwickelt hat, der hoffentlich weit über das Studium hinaus noch viele Jahre Bestand haben wird.

Ebenfalls gilt meiner Familie ein großes Dankeschön, die mich auf meinem gesamten Weg stets unterstützt und bestärkt hat. Insbesondere meiner Frau, die mir vor allem bei organisatorischen und formalen Fragen eine große Hilfe war und mir so Freiraum geschaffen hat, damit ich mich auf die technischen Inhalte konzentrieren konnte. Genauso danke ich meinem Vater für seine wertvolle Unterstützung bei der Umsetzung der mechanischen Ausführung im Rahmen dieser Arbeit sowie meiner jüngsten Schwester für ihre tatkräftige Hilfe bei den Feldversuchen.

Abschließend möchte ich mich bei allen bedanken, die mich auf diesem Weg begleitet und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Elias Lau, April 2026

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Übertragung von visuellen Informationen stellt einen zentralen Bestandteil moderner technischer Systeme dar. Insbesondere in mobilen und flexibel einsetzbaren Anwendungen gewinnt die drahtlose Übertragung zunehmend an Bedeutung, da diese eine räumliche Entkopplung von Aufnahme- und Auswerteeinheit ermöglichen. Ein Anwendungsbeispiel dafür sind Datenbrillen. Während digitale Übertragungsverfahren heute weit verbreitet sind, bieten auch analoge Konzepte weiterhin interessante Eigenschaften, beispielsweise hinsichtlich geringer Latenzzeiten und eines vergleichsweise einfachen Systemaufbaus [1].

Vor diesem Hintergrund ist die Betrachtung analoger Videoübertragungssysteme insbesondere dann relevant, wenn grundlegende Zusammenhänge der Signalübertragung untersucht oder robuste und schnell realisierbare Lösungen entwickelt werden sollen. Der praktische Aufbau solcher Systeme ermöglicht zudem ein vertieftes Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten sowie für die Einflüsse von Störungen und Übertragungsbedingungen.

Für die Anwendung von Datenbrillen gibt es verschiedene potenzielle Anwendungsfelder, in denen drahtlose Videoübertragungssysteme durch verschiedene Merkmale zukünftig eine Rolle spielen könnten. Denkbar ist beispielsweise der Einsatz in der Ausbildung von Fachkräften, um technische Zusammenhänge anschaulich zu vermitteln. Ebenso könnten Anwendungen in Trainings- und Übungsszenarien von Organisationen wie Feuerwehr oder Bundeswehr entstehen. Im sportlichen Bereich, etwa im Motorsport, wäre eine Nutzung zur Analyse und zum Coaching von Athleten vorstellbar, indem Trainer die Live-Ansicht erhalten. Ein weiteres mögliches Einsatzgebiet liegt in der Fernwartung technischer Systeme, bei der Servicetechniker vor Ort durch die Übertragung von Kamerabildern Unterstützung durch externe Spezialisten erhalten könnten [2–4].

Die Relevanz der Umsetzung lässt sich aus der hohen Anwendungsvielfalt ableiten. Die genannten Beispiele stellen jedoch nur potenzielle Anwendungsszenarien dar und sind nicht zwingend praktisch umgesetzt. Sie sollen vielmehr das mögliche Einsatzspektrum der zugrunde liegenden technischen Fragestellung verdeutlichen. Vor diesem Hintergrund befasst

sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung und dem Aufbau eines Referenzaufbaus zur analogen Videoübertragung zwischen einer Kamera und einem PC über eine Funkstrecke.

1.2 Zielstellung

Um eine strukturierte und nachvollziehbare Bearbeitung der Aufgabenstellung zu gewährleisten sowie eine fundierte Bewertung der Ergebnisse im späteren Verlauf der Arbeit zu ermöglichen, werden folgende Zielstellungen definiert.

Zielstellung 1:

Durchführung einer fundierten Analyse der grundlegenden Anforderungen an eine analoge Videoübertragung

Zielstellung 2:

Entwurf und systematische Auswahl und Bewertung geeigneter Komponenten für die Sender- und Empfängerseite unter Berücksichtigung technischer und funktionaler Kriterien

Zielstellung 3:

Realisierung eines funktionsfähigen Referenzaufbau

Zielstellung 4:

Experimentelle Untersuchung sowie Bewertung des Aufbaus unter realitätsnahen Betriebsbedingungen

Die formulierten Zielstellungen bilden die Grundlage für die strukturierte Bearbeitung des Themas und dienen zugleich als Referenzrahmen für die Bewertung der Ergebnisse im abschließenden Fazit. Dadurch trägt die Zielstellung im wesentlichen zur wissenschaftlichen Qualität, Nachvollziehbarkeit und Belastbarkeit der gesamten Arbeit bei.

2 Theoretischer Hintergrund

Dieses Kapitel dient dem Zweck das notwendige technische und normative Wissen zum Verständnis der vorliegenden Diplomarbeiten zu vermitteln. Es werden ausschließlich die aus dem jeweiligen Themenbereich zur Zielerreichung der Aufgabenstellung notwendigen Aspekte aufgegriffen.

2.1 Composite Video Baseband Signal

Eine Form der analogen Videoübertragung ist das Composite Video Baseband Signal (CVBS), im deutschen auch unter dem Begriff Farb-Bild-Austast-Synchron-Signal mit der Abkürzung FBAS bekannt. Es handelt sich dabei um ein Signal, in dem alle für die Bilddarstellung notwendigen Informationen in einem einzigen elektrischen Signal enthalten sind. Das CVBS bildet die Grundlage zahlreicher analoger Fernsehnormen. Die konkrete Ausprägung des Signals ist dabei jedoch nicht einheitlich, sondern wird durch entsprechende Farbcodierungsnormen wie Phase Alternating Line (PAL), National Television System Committee (NTSC) oder Séquentiel couleur à mémoire (SECAM) in Kombination mit den Basisnormen der Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR) bzw. später der International Telecommunication Union (ITU) definiert [5–8].

2.1.1 Aufbau

Das CVBS kann durch folgende Formel beschrieben werden [5, S. 8].

$$U_{CVBS}(t) = U_Y(t) + k \cdot U_C(t) + U_{Sync}(t) \quad (1)$$

In der Formel (1) stellt $U_Y(t)$ die Luminanzkomponente dar, welche die Helligkeitsinformation der Bildpunkte beschreibt. Die Luminanz liegt in einem Signalbereich von 0 V bis 0,7 V. Dabei entspricht 0,7 V dem Weißpegel und 0 V dem Schwarzpegel. Die Luminanzkomponente wird nach dem YUV-Farbmodell gebildet, welche die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auge berücksichtigt. Sie wird aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau zusammengesetzt [5, 6]. Diese Zusammensetzung lässt sich in folgender Gleichung darstellen [5, S. 4, 6, S. 67].

$$U_Y = 0,30 \cdot U_R + 0,59 \cdot U_G + 0,11 \cdot U_B \quad (2)$$

Die Chrominanz $U_C(t)$ aus Formel (1) wird aus zwei Farbdifferenzsignalen mittels einer Modulation gebildet [5, 6]. Die Farbdifferenzsignale U_U und U_V lassen sich durch folgende Formel beschreiben [5, S. 4].

$$U_U = k_U \cdot (U_B - U_Y) \quad U_V = k_V \cdot (U_R - U_Y) \quad (3)$$

Die Modulation dieser beiden Differenzsignal ist notwendig, um die Chrominanzkomponente in einer Frequenzlücke der Luminanzkomponente zu übertragen, ohne die Bandbreite des CVBS erweitern zu müssen. Bei NTSC und PAL wird eine Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM) und bei SECAM eine Frequenzmodulation (FM) angewendet. Der Faktor k in der Formel (1) ist ein Skalierungsfaktor, um ein Übersteuern des CVBS zu verhindern. Die Konstanten k_U und k_V in Formel (3) dienen dazu, die Übermodulation der Farbartsignalamplitude in dem CVBS auf einen tolerierbaren Wert von circa 33 % zu begrenzen. Anderenfalls würde die Amplitude die Synchronimpulse unterschreiten und somit zu Übertragungsproblemen führen [5, 6]. Sie sind durch folgende Werte definiert [6, S. 79].

$$k_U = 0,49 \quad \text{und} \quad k_V = 0,88 \quad (4)$$

Die dritte Komponente aus Formel (1) sind die Synchronimpulse des Synchronsignals $U_{sync}(t)$. Es handelt sich dabei um Impulse mit einem Pegel von -0,3 V um den Abstand zu den Nutzsignalen so groß wie möglich zu gestalten. Diese dienen dem Zweck den Bildaufbau auf den Empfangsgeräten zu stabilisieren. Diese werden in den Austastlücken des Aufnahmeapparates untergebracht, da in diesem Teil des Signals keine Informationen untergebracht sind. Vor jeder Zeile gibt es einen horizontalen Synchronimpuls (H-Impuls) und vor jedem (Halb-)Bild gibt es einen vertikalen Synchronimpulsblock (V-Impulsblock). Dadurch wird gewährleistet, dass zwischen horizontaler und vertikaler Synchronisation unterschieden werden kann [5–8]. Ein Bildzeile nach dem beschriebenen Aufbau eines CVBS ist in der Abbildung 1 dargestellt.

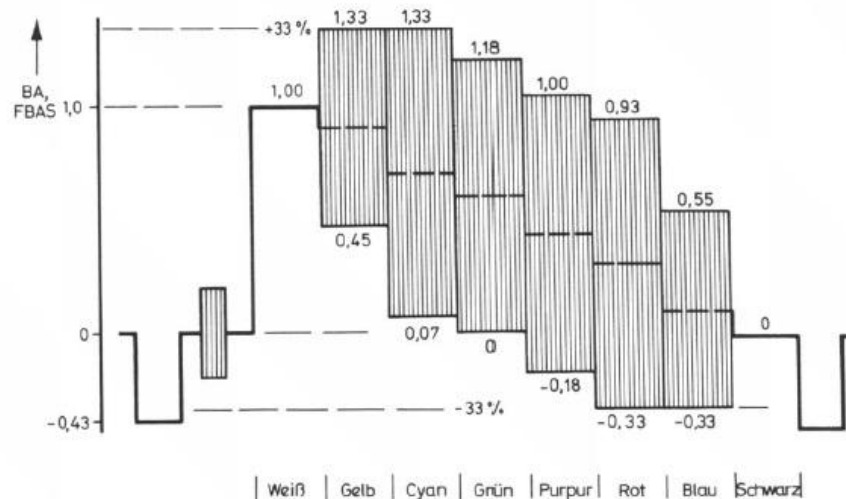


Abbildung 1 Zeilenoszillogramm des CVBS für die Normfarbbalkenfolge, Farbsättigung 100%, mit reduzierten Farbdifferenzsignalen [8, S. 65]

Aufgrund von technischen Schwierigkeiten im Bildaufbau bei den Empfangsgeräten zu Beginn der analogen Videoübertragung wurde festgelegt das Bild in zwei Halbbildern aufzuteilen und nacheinander zu übermitteln. Dieses Verfahren wird als Zeilensprungverfahren bezeichnet. Im ersten Halbbild werden dabei die geraden Zeilen abgetastet und übermittelt. Im zweiten Durchlauf wird dieser Vorgang äquivalent mit den ungeraden Zeilen durchgeführt. Somit setzt sich ein Bild aus zwei Halbbildern zusammen. Dies nennt man auch Interlaced-Darstellung [5–7].

2.1.2 Phase Alternating Line

Die Farbkodierungsnorm PAL ist eine Weiterentwicklung des NTSC und wurde in weiten Teilen der Welt angewendet. Sie definiert die genaue Bildung der Chrominanzkomponente eines CVBS und beruht dabei auf Formel (3). Diese definiert, dass die beiden Farbdifferenzsignale U und V mithilfe eines Farbhilfsträger, welcher normalerweise eine Frequenz von circa 4,43 MHz angesetzt ist, über die QAM gebildet wird. Im Vergleich zum NTSC wird jedoch die Phase des Farbdifferenzsignal V von Zeile zu Zeile umgepolt. Dies wird durch einen stetigen Vorzeichenwechsel des Signals erreicht. Die Maßnahme wurde entwickelt, um Farbabweichungen durch Phasenübertragungsfehler zu verringern, wie diese bei NTSC auftreten. Um die beiden Farbdifferenzsignale U und V im Empfänger aus dem CVBS demodulieren zu können wird ein Referenzsignal benötigt, welches eine definierte Phase und Farbinformation enthält. Dieses Signal wird als PAL-Farbträgerburst bezeichnet. Da die

Phase des Farbdifferenzsignal V von Zeile zu Zeile alterniert, gibt es den A-Burst mit einer Phase von $+135^\circ$ und den B-Burst mit einer Phase von -135° . Der Farbträgerburst ist circa $2,3 \mu\text{s}$ lang und wird nach dem H-Impuls im Austastbereich untergebracht [5–9].

2.1.3 CCIR- bzw. ITU-R-Norm B, G

In dieser Diplomarbeit wird ein CVBS verwendet, welches grundlegend auf der Basisnorm B, G der CCIR- bzw. ITU-R-Norm unter Anwendung der Farbkodierungsnorm PAL beruht. Die konkreten Werte des CVBS nach dieser Norm sind in Tabelle 1 dargestellt.

CCIR- bzw. ITU-R-Norm	B, G
Bildzeilen	625
Zeilenfrequenz	15625 Hz
Bildwechselfrequenz	25 Hz
Zeilendauer	64 μs
Zeilendauer (sichtbarer Anteil)	52 μs
Seitenverhältnis	4:3
Videobandbreite	5 MHz
Farbkodierungsnorm	PAL

Tabelle 1 Basiswerte der CCIR- bzw. ITU-R-Norm B, G nach [6, S. 13, 7, S. 324]

Bei der Videobandbreite von 5 MHz handelt es sich um die Mindestanforderung der Übertragungsbandbreite eines CVBS um die Bildinformationen verlustfrei übertragen zu können. Neben dem Seitenverhältnis 4:3 ist es auch möglich das Seitenverhältnis von 16:9 zu übertragen, indem das Bild horizontal gestaucht wird. Dadurch ist jedoch eine höhere Bandbreite notwendig, um das Bild fehlerfrei übertragen zu können [6, 7, 10].

2.2 Analoge Funkübertragung von Videosignalen

Die analoge Funktechnik ist ein bewährtes Verfahren zur drahtlosen Übertragung kontinuierlicher Signale. Sie bildet die Grundlage zahlreicher klassischer Kommunikationssysteme und findet insbesondere Anwendung in der Übertragung von Audio- und Videosignalen. Zur Realisierung einer Funkübertragungsstrecke ist es erforderlich, das niederfrequente (NF) Nutzsignal auf ein hochfrequentes (HF) Trägersignal zu modulieren, damit eine effiziente Übertragung des Signals über ein Antennensystem ermöglicht wird. Verschiedene Eigenschaften der Funkstrecke wie z.B. die Sendeleistung oder aber Störeinflüsse wirken sich unmittelbar auf die Qualität des empfangenen Signals aus. Daher ist ein grundlegendes Verständnis dieser Zusammenhänge Voraussetzung für die Auslegung analoger Funkübertragungssysteme [7, 11–13].

2.2.1 Prinzip der Übertragung

Eine direkte Abstrahlung des CVBS ist aus mehreren Gründen unpraktikabel. Bei dem CVBS handelt es sich um eine NF-Signal. Dieses würde aufgrund der großen zugehörigen Wellenlängen große Antennen erfordern, da die Antennengröße direkt mit der Wellenlänge zusammenhängt. Aus diesem Grund wird das Videosignal auf einen HF-Trägersignal auf moduliert. Dieser Träger liegt typischerweise im GHz-Bereich und ermöglicht durch seine geringe Wellenlänge eine praktikable Antennengröße sowie eine effiziente Abstrahlung [7, 11–13].

Bei der analogen Videoübertragung mittels Funk wird das Basisbandsignal einer Modulation unterzogen. Dabei verändert das Nutzsignal eine charakteristische Eigenschaft eines HF-Trägersignals. Diese charakteristischen Eigenschaften können die Amplitude, die Frequenz oder die Phase des Trägersignals sein. In analogen Videosendern, wie sie aktuell handelsüblich erhältlich sind, kommt üblicherweise die FM zum Einsatz. Hierbei wird die Frequenz des Trägers proportional zur Amplitude des Videosignals variiert. Ein Vorteil der FM liegt in ihrer vergleichsweise hohen Robustheit gegenüber Amplitudenstörungen. Störsignale wirken sich primär als Rauschen im Bild aus, was zu einem kontinuierlichen Qualitätsabfall führt, jedoch nicht zu einem abrupten Signalverlust. In Abbildung 2 ist das Prinzip einer FM durch zwei Diagramme dargestellt. Dabei ist in dem oberen Diagramm das Nutzsignal und in dem unteren Diagramm das frequenzmodulierte Übertragungssignal dargestellt. Beide sind in Abhängigkeit der Zeit gesetzt [7, 11–13].

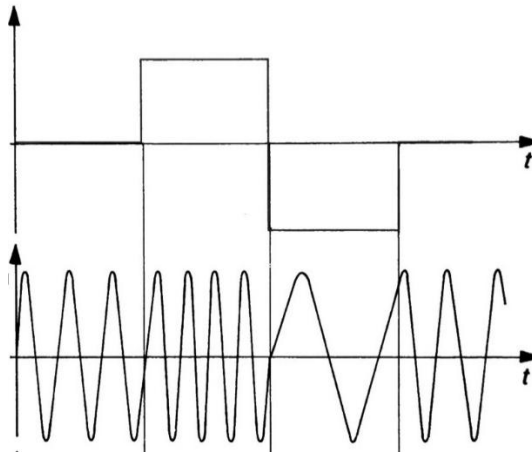


Abbildung 2 Darstellung einer Frequenzmodulation [7, S. 220]

Der grundsätzliche Signalfluss einer analogen Funkübertragungsstrecke lässt sich, wie in Abbildung 3 dargestellt, beschreiben: Durch die Modulation entsteht ein hochfrequentes Signal, welches die Informationen des ursprünglichen Videosignals trägt und über eine Antenne abgestrahlt werden kann. Am Empfänger erfolgt die Demodulation, bei der das ursprüngliche Basisbandsignal wiedergewonnen wird [7, 11–13].

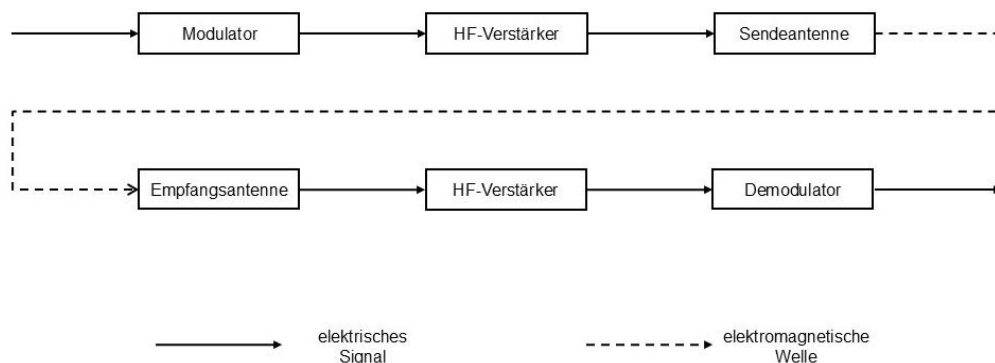


Abbildung 3 Schematischer Signalfluss eine Funkübertragungsstrecke nach [11, S. 23, 14]

2.2.2 Eigenschaften der HF-Übertragung im GHz-Bereich

Die HF-Übertragung im GHz-Bereich gehört zum sogenannten Mikrowellen- bis Millimeterwellenbereich des elektromagnetischen Spektrums. Für diesen Frequenzbereich sind kurze Wellenlängen im Zentimeter- bis Millimeterbereich charakteristisch. Mit steigender Frequenz verkürzt sich die Wellenlänge λ gemäß Formel (5) wobei c die Lichtgeschwindigkeit

und f die Frequenz ist. Die kurzen Wellenlängen haben entscheidende Auswirkungen auf die Antennenauswahl und die Ausbreitung des Funksignals [7, 11, 15, S. 105].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

Ein Zentrales Merkmal der Funkübertragung im GHz-Bereich ist die zunehmende Freiraumdämpfung L_F (FSPL) mit steigender Frequenz. Sie steigt proportional zum Quadrat der Frequenz, wie in Formel (6) ersichtlich ist. [7, S. 197, 11]

$$L_F = 20 \cdot \lg\left(\frac{4\pi}{c} \cdot f \cdot d\right) \quad (6)$$

Daraus ergeben sich zwei Erkenntnisse. Zum einen führen höhere Frequenzen bei gleicher Sendeleistung und Distanz zu höheren Verlusten. Zum anderen nimmt die erreichbare Reichweite ohne zusätzliche Maßnahmen ab. Dies lässt sich anhand der Ausbreitungsmechanismen begründen, welche in Abbildung 4 dargestellt sind. Im GHz-Bereich wirken sich Reflexion, Beugung und Streuung deutlich mehr auf die Ausbreitung aus als z.B. bei Frequenzen im MHz-Bereich. Die elektromagnetischen Wellen werden stärker an metallischen Oberflächen und Gebäudestrukturen reflektiert. Aufgrund der geringen Wellenlängen können bereits kleinere Objekte als Reflektoren wirken. Die Beugungsfähigkeit nimmt mit sinkender Wellenlänge ab. Hindernisse, die deutlich größer als die Wellenlänge selbst sind, verursachen ausgeprägte Abschattungen. Deshalb ist im GHz-Bereich häufig eine quasi-optische Sichtverbindung (LOS) erforderlich (Abbildung 5). Unebene Flächen sowie kleine Objekte im Bereich der Wellenlänge verursachen starke Streuungen. Besonders bei Frequenzen im mittleren zweistelligen GHz-Bereich wird Streuung an der Vegetation, Fassadenstrukturen oder Niederschlag relevant [7, 11].

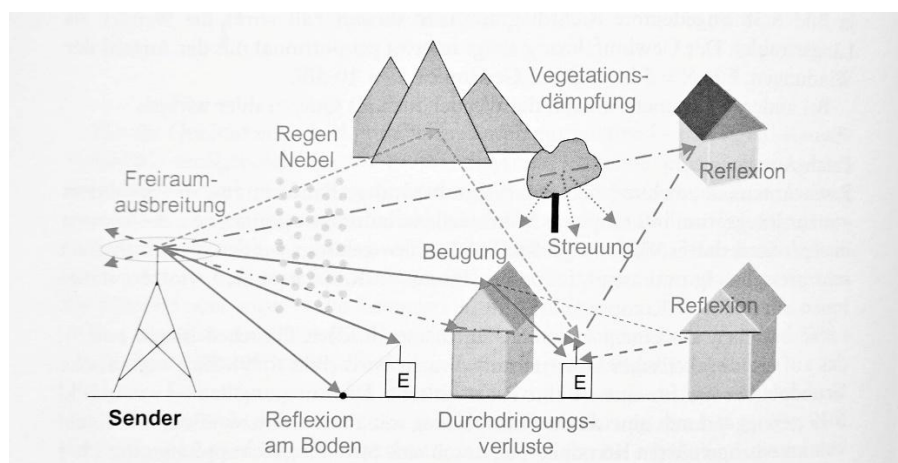


Abbildung 4 Ausbreitungsmechanismen von elektromagnetischen Wellen [7, S. 196]

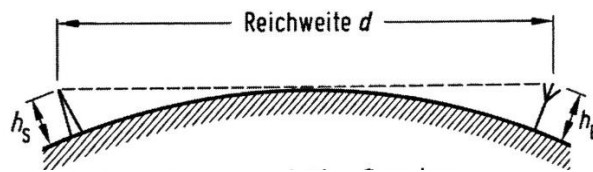


Abbildung 5 Quasi-Optische Sichtverbindung [11, S. 87]

Aufgrund der eben beschriebenen Ausbreitungsmechanismen kann eine theoretisch maximale Reichweite einer Funkübertragungstrecke im GHz-Bereich bestimmt werden. Sie entspricht der LOS, welche auch Radiohorizont genannt und nach Formel (7) berechnet wird [11, 16].

$$d_{MAX} \approx 4,12 \cdot 10^3 m^{1/2} \cdot (\sqrt{h_S} + \sqrt{h_E}) \quad (7)$$

Die maximale Reichweite d_{MAX} ist abhängig von der Antennenhöhe des Senders h_S und des Empfängers h_E sowie der Erdkrümmung, welche im Faktor berücksichtigt ist. Unter der Annahme, dass sowohl die Antennenhöhe des Senders sowie Empfängers 2 m beträgt ($h_S = h_E = 2 m$), wäre eine Reichweite d_{MAX} von circa 11,7 km möglich. Diese ist jedoch in den wenigsten Fällen erreichbar, da die FSPL auf diese Entfernung im GHz-Bereich sehr hoch ist. Somit ist entweder eine enorme Sendeleistungen oder eine sehr hohe Empfindlichkeit des Empfängers notwendig um die maximale Reichweite d_{MAX} tatsächlich zu erzielen [11, 16]. Durch das Einsetzen der Formel (6) in Formel (8) und anschließende Umstellung nach der Reichweite d erhält man die Formel (9), mit der sich die Reichweite d unter Berücksichtigung der FSPL L_F berechnen lässt [7, S. 197].

$$L_E = L_S + G_S - L_F + G_E \quad (8)$$

$$L_E = L_S + G_S - 20 \cdot \lg\left(\frac{4\pi}{c} \cdot f \cdot d\right) + G_E$$

$$L_E = L_S + G_S - 20 \cdot \lg\left(\frac{4\pi}{c} \cdot f\right) - 20 \cdot \lg(d) + G_E$$

$$d = 10^{\left(\frac{L_S + G_S + G_E - L_E}{20} - \lg\left(\frac{4\pi}{c} \cdot f\right)\right)} \quad (9)$$

Dabei ist L_E der Empfindlichkeitspegel des Empfängers, L_S der Sendepiegel, G_S der Sendantennengewinn und G_E der Empfangsantennengewinn. Eine konkrete Aussage zu der maximal realisierbaren Reichweite ist somit stark systemabhängig und erst nach der Auswahl von Komponenten möglich (siehe Kapitel 6.7) [7].

2.2.3 Antennentechnik

Antennen stellen die Schnittstelle zwischen der elektrischen Signalverarbeitung und der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen dar. Für die Bewertung und Auswahl geeigneter Antennen sind mehrere Parameter von Bedeutung [7, 11–13].

Der Antennengewinn beschreibt, wie stark eine Antenne die abgestrahlte Leistung in eine bestimmte Richtung bündelt. Antennen mit höheren Gewinn weisen eine stärkere Richtwirkung auf, wodurch sich die Reichweite in der Hauptabstrahlrichtung erhöht [7, 11].

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Polarisation der Antenne, welche die Richtung des elektrischen und magnetischen Feldes der abgestrahlten Welle beschreibt. Dabei kann im Wesentlichen zwischen der linearen und zirkularen Polarisation unterschieden werden. Bei der linearen Polarisation schwingen die Feldkomponenten senkrecht zu der Ausbreitungsrichtung der Antenne. Die Richtung der Felder ist dabei zeitlich und räumlich konstant und sie stehen senkrecht zueinander. Dabei gibt es je nach Ausrichtung der Antennen noch Unterkategorie wie z.B. die horizontale und vertikale Polarisation. Ist die Antenne horizontal ausgerichtet, so handelt es sich um eine horizontale Polarisation, da das elektrische Feld parallel zur Erdoberfläche schwingt (Abbildung 6) [7, 11, 17].

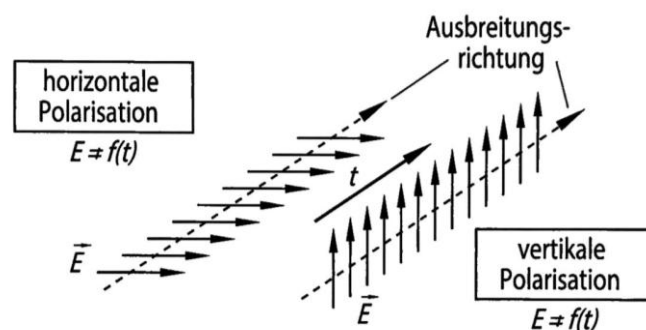


Abbildung 6 Lineare Polarisation [11, S. 158]

Bei der zirkularen Polarisation sind die Feldkomponenten zeitlich und räumlich veränderlich und drehen sich um die Ausbreitungsrichtung, jedoch schwingen sie weiterhin senkrecht zueinander. Diese Drehung erfolgt dadurch, dass z.B. von zwei senkrecht zueinander ausgerichtete Antennen dasselbe Signal mit einer Phasenverschiebung von $\pm 90^\circ$ abgestrahlt wird. Innerhalb einer Wellenlänge erfolgt somit eine vollständige Drehung der Feldkomponenten um die Ausbreitungsrichtung. Bei der zirkularen Polarisation gibt es ebenfalls Unterkategorie. Jedoch entstehen dies nicht durch die Ausrichtung, sondern durch den Aufbau

der Antennen. Die Feldkomponenten können entweder linksdrehend oder rechtsdrehend sein (Abbildung 7) [7, 11, 17].

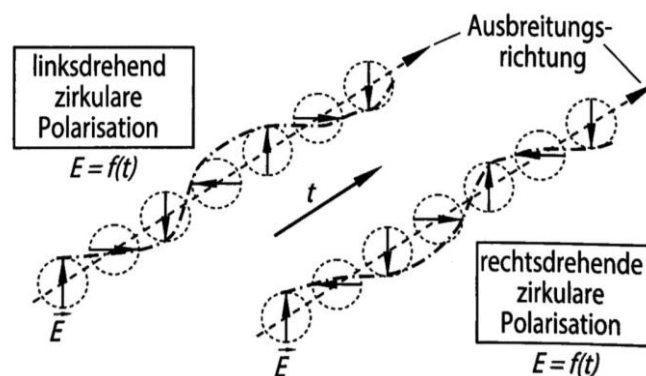


Abbildung 7 Zirkulare Polarisation [11, S. 158]

Um einen Überblick der beiden Polarisationsformen zu erhalten, wurde ein Vergleich nach ausgewählten Kriterien durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Kriterium	Lineare Polarisation	Zirkulare Polarisation
Grundprinzip	Elektrisches Feld schwingt in konstanter Ebene	Elektrisches Feld rotiert während Ausbreitung und beschreibt Kreisbahn
Typische Formen	Horizontale, Vertikale und Schräg	Rechtszirkular (RHCP) und Linkszirkular (LHCP)
Ausrichtung der Antenne	Gleiche Ausrichtung von Sende- und Empfangsantenne notwendig	Weitgehend unabhängige Ausrichtung von Sende- und Empfangsantenne möglich
Polarisationsverluste	Starke Polarisationsverluste bei unterschiedlicher Ausrichtung der Antennen	Starke Polarisationsverluste nur bei falscher Polarisation
Effizienz / Gewinn	Hoher Antennengewinn und effiziente Leistungsübertragung gut realisierbar	Antennengewinn bei vergleichbarer Baugröße meist geringer

Kriterium	Lineare Polarisation	Zirkulare Polarisation
Antennenaufbau	Konstruktiv meist einfach	Spezielle Geometrien oder Phasenverschiebungen notwendig für Erzeugung zirkularer Polarisation
Typische Anwendungen	Terrestrische Funkkommunikation, Rundfunk, Mobilfunk, WLAN und Richtfunk	Satellitenkommunikation, Navigationssysteme und Raumfahrtanwendungen

Tabelle 2 Vergleich von Linearer und Zirkularer Polarisation nach [7, 11, 17]

2.2.4 Gesetzliche Rahmenbedingungen in Deutschland

In Deutschland unterliegt die Nutzung von Funkfrequenzen gesetzlichen Vorgaben. Ziel dieser Vorgaben ist es, Störungen zwischen verschiedenen Funkdiensten zu vermeiden und eine geordnete Nutzung der verfügbaren Frequenzbereiche sicherzustellen. Die dafür zuständige Behörde ist die Bundesnetzagentur (BNetzA). Die BNetzA überwacht die Einhaltung der Frequenzzuteilungen und die maximal zulässigen Sendeleistungen. [11, 18–20]

Rechtliche Grundlagen für den Betrieb von Funkanlagen werden durch nationale Gesetze sowie durch europäische und internationale Regelwerke bestimmt. Für Anwendungen im Bereich der drahtlosen Videoübertragung sind insbesondere lizenzfreie Frequenzbereiche von Bedeutung, die für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen (ISM-Bänder) vorgesehen sind. Darüber hinaus existieren Frequenzbereiche, die dem Amateurfunkdienst zugewiesen sind und nur mit entsprechender Lizenz genutzt werden dürfen [11, 18–20].

ISM-Bänder dürfen unter bestimmten technischen Voraussetzungen ohne individuelle Frequenzzuteilung genutzt werden [18]. Zu den Bedingungen gehören insbesondere die folgenden:

- Einhaltung der maximal zulässigen Sendeleistung
- Verwendung von Geräten, die den geltenden technischen Normen entsprechen
- Betrieb ohne Anspruch auf Schutz vor Störungen durch andere Nutzer desselben Frequenzbereiches

Da ISM-Bänder von vielen unterschiedlichen Funkanwendungen genutzt werden, kann es zu gegenseitigen Beeinflussungen kommen. Typische Anwendungen in diesen Frequenzbereichen sind beispielsweise drahtlose Netzwerke, Kurzstreckenfunk oder Videoübertragungssysteme. Für die Nutzung lizenzfreier Funkanlagen gelten in Europa harmonisierte technische Normen, die von dem Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) definiert werden. Diese legen unter anderem Anforderungen an Sendeleistung, Kanalbandbreite und spektrale Eigenschaften der Funkgeräte fest [12, 13, 18].

Die maximal zulässige Sendeleistung wird häufig als äquivalente isotrop abgestrahlte Leistung (EIRP) angegeben. Dieser Wert berücksichtigt neben der Ausgangsleistung des Senders auch den Antennengewinn. Durch diese Begrenzung soll sichergestellt werden, dass Funkanlagen anderer Nutzer im gleichen Frequenzbereich möglichst wenig gestört werden. Die Berechnung des *EIRP* erfolgt mit der Formel (10). Dabei ist L_K die Dämpfung der Verbindung zwischen Sender und Sendeantenne, falls diese nicht direkt miteinander verbunden sind [6, 7, S. 198, 11].

$$EIRP = L_S - L_K + G_S \quad (10)$$

Die rechtliche Grundlage für die Zuteilung und Nutzung von Frequenzbereichen bildet in Deutschland unter anderem die Frequenzverordnung. Darin sind die verschiedenen Funkdienste sowie die ihnen zugewiesenen Frequenzbereiche festgelegt [18].

Neben den lizenzfreien Frequenzbereichen existieren spezielle Frequenzbereiche für den Amateurfunkdienst. Dieser dient vor allem experimentellen, technischen und wissenschaftlichen Zwecken sowie der Ausbildung im Bereich der Funktechnik. Die rechtliche Grundlage für den Amateurfunkbetrieb in Deutschland bildet das Amateurfunkgesetz. Der Betrieb von Amateurfunkanlagen ist nur Personen gestattet, die eine entsprechende Amateurfunkprüfung abgelegt und eine gültige Amateurfunkzulassung erhalten haben. Ein wesentliches Merkmal des Amateurfunks ist, dass Funkamateure ihre Geräte häufig selbst entwickeln, modifizieren oder experimentell betreiben. Dadurch entstehen größere Freiheiten hinsichtlich technischer Gestaltungsmöglichkeiten als bei standardisierten Funkgeräten im lizenzfreien Bereich. In vielen Amateurfunkbändern sind deutlich höhere Sendeleistungen zulässig als in den lizenzfreien ISM-Bändern [18–20]. Gleichzeitig gelten jedoch besondere Betriebsbedingungen. Der Amateurfunkdienst stellt somit einen wichtigen Bereich für technische Experimente und Weiterentwicklung im Funkbereich dar, ist jedoch in der Regel nicht für kommerzielle oder produktive Anwendungen vorgesehen [18–20].

2.3 Digitalisierung analoger Videosignale

Analoge Videosignale sind sowohl in der Zeit als auch in ihrer Amplitude kontinuierlich, während digitale Systeme eine diskrete Darstellung der Signalwerte benötigen. Die Umwandlung erfolgt daher durch Abtastung und Quantisierung des analogen Signals, wodurch eine Folge diskreter digitaler Werte entsteht, die das ursprüngliche Signal approximieren. Die Digitalisierung analoger Videosignale stellt somit einen grundlegenden Schritt dar, um klassische analoge Bildquellen in digitale Bildverarbeitungssysteme zu integrieren. In praktischen Anwendungen wird dieser Prozess häufig durch spezialisierte Video-Decoder realisiert, die neben der Analog-Digital-Wandlung auch weitere Funktionen der Signalaufbereitung und Synchronisationsverarbeitung integrieren [21–26].

2.3.1 Signalaufbereitung

Vor der eigentlichen Digitalisierung ist eine geeignete Aufbereitung des analogen Eingangssignals erforderlich. Ziel dieser Signalaufbereitung ist es, das Eingangssignal hinsichtlich Pegel, Bandbreite und Störanteilen so anzupassen, dass eine möglichst fehlerarme Analog-Digital-Wandlung erfolgen kann [21, 24, 26].

Ein zentraler Bestandteil dieser Signalaufbereitung ist die Bandbreitenbegrenzung durch ein Anti-Aliasing-Filter. Dabei handelt es sich in der Regel um ein Tiefpassfilter, welches Signalanteile oberhalb der halben Abtastfrequenz unterdrückt. Ohne eine solche Filterung würden hochfrequente Signalanteile während der Abtastung in niedrigere Frequenzbereiche gespiegelt werden. Dieser Effekt wird als Aliasing bezeichnet und führt zu nicht mehr korrigierbaren Signalverfälschungen [21, 24–26].

Darüber hinaus wird häufig eine Pegel- bzw. Verstärkungsanpassung des Eingangssignals durchgeführt. Diese stellt sicher, dass der Dynamikbereich des Analog-Digital-Wandlers (ADC) möglichst vollständig ausgenutzt wird und sowohl Übersteuerungen als auch unnötig große Quantisierungsfehler vermieden werden [21, 23, 26].

2.3.2 Analog-Digital-Wandlung

Die eigentliche Digitalisierung des Videosignals erfolgt durch einen ADC. Dieser tastet das analoge Signal in festen zeitlichen Abständen ab und wandelt die gemessenen Amplitudenwerte in digitale Zahlenwerte um [25, 26]. Der Digitalisierungsprozess lässt sich in drei grundlegende Schritte unterteilen:

Abtastung

Das analoge Signal wird in äquidistanten Zeitintervallen abgetastet. Die Abtastfrequenz bestimmt dabei, wie viele Signalwerte pro Zeiteinheit erfasst werden [21, 24–26].

Quantisierung

Die kontinuierlichen Amplitudenwerte werden auf eine endliche Anzahl diskreter Stufen abgebildet. Die Anzahl dieser Stufen wird durch die Auflösung des ADC bestimmt, die üblicherweise in Bit angegeben wird [21, 24–26].

Kodierung

Die quantisierten Werte werden anschließend in eine binäre Darstellung überführt und als digitaler Datenstrom ausgegeben [21, 22, 24–26].

Die Genauigkeit der Digitalisierung wird im Wesentlichen durch die Abtastfrequenz sowie die Bitauflösung des ADC bestimmt. Eine höhere Abtastfrequenz verbessert die zeitliche Repräsentation des Signals, während eine höhere Bitauflösung das Quantisierungsrauschen reduziert [21, 24–26].

2.3.3 Anforderungen an die Abtastfrequenz

Die Wahl einer geeigneten Abtastfrequenz ist entscheidend für eine möglichst verlustarme Digitalisierung eines analogen Signals. Die theoretische Grundlage hierfür bildet das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem. Dieses besagt, dass ein bandbegrenzte Signal vollständig rekonstruiert werden kann, wenn die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch ist wie die höchste im Signal enthaltene Frequenzkomponente. Anderenfalls kann es zu einer Fehlinterpretation des zu Digitalisierenden Signals kommen, wie in Abbildung 8 dargestellt. [21, 24–26].

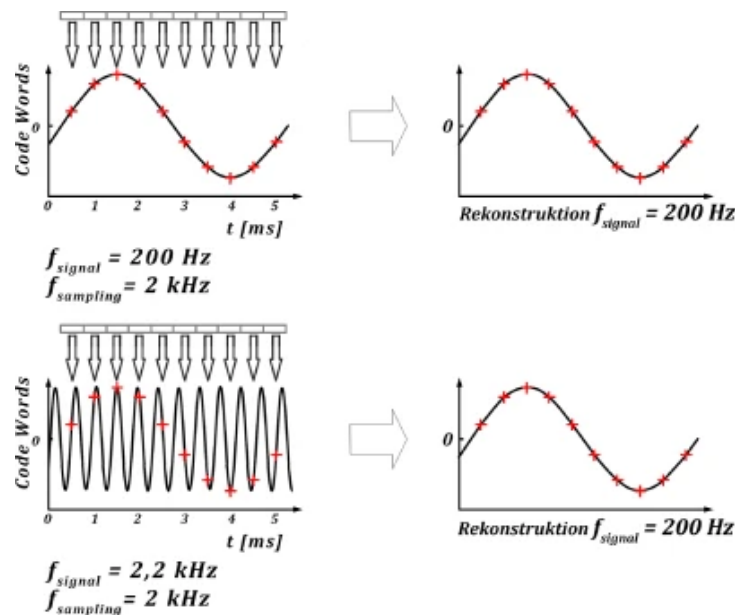


Abbildung 8 Artefakte nahe der Nyquist-Frequenz [26, S. 57]

In praktischen Systemen wird die Abtastfrequenz häufig etwas höher gewählt als die theoretische Nyquist-Grenze. Dies berücksichtigt reale Effekte wie begrenzte Filtersteilheiten oder zeitliche Schwankungen im Abtasttakt. Zusätzlich wird das Eingangssignal durch ein Anti-Aliasing-Filter bandbegrenzt, sodass keine Frequenzanteile oberhalb der halben Abtastfrequenz in den ADC gelangen [24–26].

2.3.4 Digitale Repräsentation der Bilddaten

Nach der Analog-Digital-Wandlung liegt das Videosignal als Folge digitaler Abtastwerte vor. Diese Werte beschreiben die zeitliche Signalform des ursprünglichen analogen Signals. In einem weiteren Verarbeitungsschritt werden diese Daten entsprechend der Struktur des Videosignals zu Bildzeilen und Bildframes organisiert, wodurch eine zweidimensionale Darstellung des Bildinhalts entsteht [21, 24, 26].

Für die Darstellung von Farbinformationen wird in vielen digitalen Videosystemen der YCbCr-Farbraum verwendet. In diesem Modell wird die Luminanzkomponente von den Farbdifferenzsignalen Cb und Cr getrennt gespeichert. Diese Trennung ermöglicht eine effizientere Datenrepräsentation, da das menschliche visuelle System empfindlicher auf Änderungen der Helligkeit als auf Änderungen der Farbinformation reagiert. Aus diesem Grund werden Chrominanzkomponenten häufig mit reduzierter räumlicher Auflösung gespeichert. Ein verbreitetes Verfahren ist das Chroma-Subsampling, beispielsweise im Format 4:2:2,

bei dem die Farbinformation horizontal mit halber Auflösung gegenüber der Luminanz gespeichert wird (Abbildung 9) [21, 24, 26].

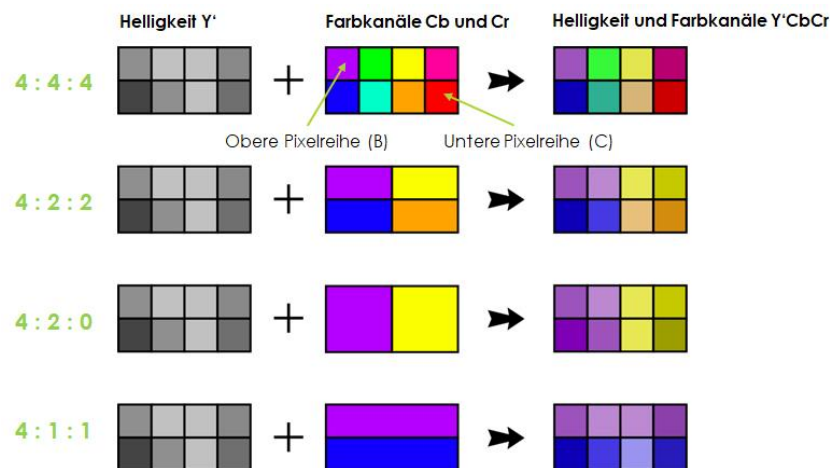


Abbildung 9 Darstellung des Chroma-Subsampling der verschiedenen Format [27]

2.3.5 Implementierung in Video-Decoder-ICs

In praktischen Anwendungen wird die Digitalisierung analoger Videosignale häufig durch spezialisierte Integrated Circuits (IC) realisiert. Diese vereinen mehrere signalverarbeitungstechnische Funktionen innerhalb eines Bausteins [21, 24]. Typische Funktionen eines solchen Video-Decoders umfassen unter anderem:

- analoge Signalaufbereitung
- Analog-Digital-Wandlung
- Synchronisationsdetektion
- interne Signalverarbeitung und Formatierung der Bilddaten

Durch die Integration dieser Funktionen kann ein analoges Videosignal mit geringem externen Hardwareaufwand digitalisiert werden. Der Decoder stellt anschließend einen digitalen Videodatenstrom bereit, der von nachfolgenden Verarbeitungseinheiten weiterverarbeitet werden kann. Solche integrierten Lösungen erleichtern die Einbindung analoger Videosysteme in moderne digitale Bildverarbeitungsarchitekturen [21, 24].

2.4 Mobile Industry Processor Interface

Das Mobile Industry Processor Interface (MIPI) ist eine Schnittstelle zur Übertragung großer Datenmengen zwischen Komponenten elektronischer Systeme, insbesondere zwischen Bildsensoren, Displays und Prozessoren. Aufgrund der hohen Übertragungsrates, des geringen Energieverbrauchs und der geringen Latenz wird MIPI in zahlreichen Anwendungen eingesetzt, beispielsweise in Smartphones, eingebetteten Systemen, industriellen Kameras oder IoT-Geräten. Der MIPI-Standard wird in verschiedenen Branchen eingesetzt und ermöglicht eine effiziente Übertragung großer Datenvolumen, etwa von hochauflösenden Kameras oder Displays. Durch die hohe Verbreitung des Standards existiert ein umfangreiches Ökosystem aus kompatiblen IC und Hardwarekomponenten, wodurch sich MIPI leicht in unterschiedliche Systeme integrieren lässt. Die Schnittstelle basiert auf serieller Hochgeschwindigkeitskommunikation und wird insbesondere für die Übertragung von Bilddaten verwendet. Neben den eigentlichen Bilddaten werden über die Schnittstelle auch Steuerinformationen und Konfigurationsparameter übertragen, beispielsweise Einstellungen eines Displaycontrollers oder anderer Systemkomponenten [28, 29].

2.4.1 Funktionsprinzip

Eine typische Anwendung von MIPI ist die Anbindung eines Bildsensors an einen Host-Prozessor oder ein System-on-Chip (SoC). In diesem Szenario erfasst der Kamerasensor ein Bild und überträgt die erzeugten Daten über die MIPI-Schnittstelle an den Host, wo sie weiterverarbeitet oder gespeichert werden. Die Bilddaten werden dabei in einzelne Frames unterteilt. Jeder Frame wird wiederum in Zeilen aufgeteilt und anschließend seriell übertragen. Auf diese Weise kann der komplette Bildstrom effizient vom Sensor zum Empfänger übertragen werden. Zur Datenübertragung verwendet das MIPI-Protokoll paketbasierte Kommunikation. Die Pakete enthalten neben den eigentlichen Nutzdaten auch Informationen über das Datenformat sowie Fehlerkorrekturmechanismen, wodurch eine zuverlässige Übertragung gewährleistet wird [30].

2.4.2 Architektur

Die Architektur von MIPI basiert auf einer mehrschichtigen Architektur nach dem OSI-Referenzmodell (Open Systems Interconnection). Durch diese Struktur werden verschiedene Aufgaben der Datenübertragung klar getrennt, wodurch eine flexible und skalierbare Systemintegration ermöglicht wird. Sie besteht aus drei funktionalen Ebenen, die jeweils

spezifische Aufgaben innerhalb der Datenkommunikation übernehmen [28–31]. In Abbildung 10 sind diese Schichten sowie deren Verknüpfungen dargestellt.

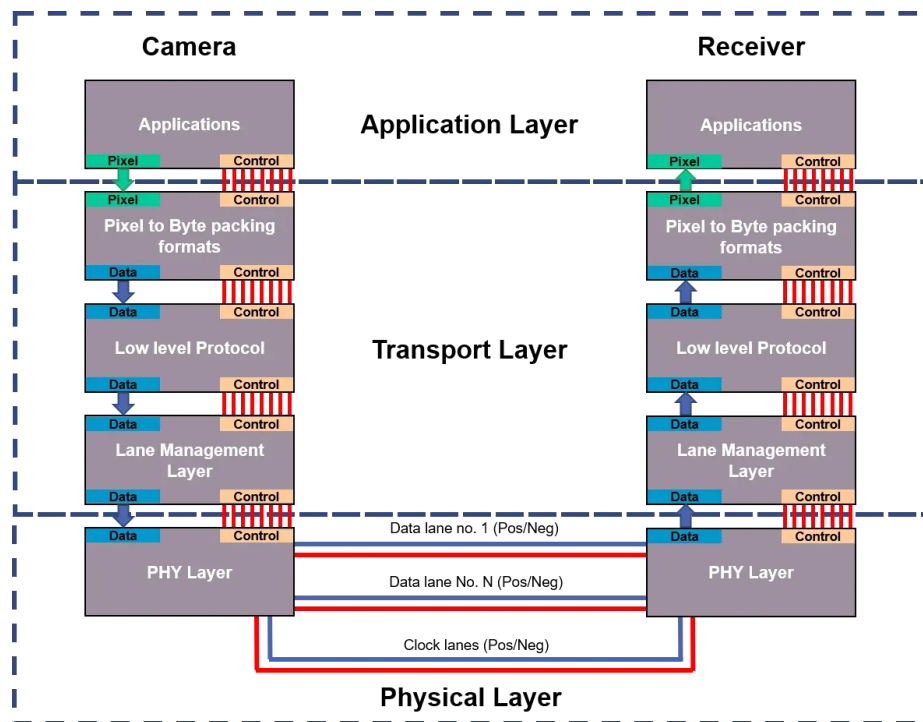


Abbildung 10 Architektur von MIPI nach OSI-Referenzmodell [29]

Anwendungsschicht

In dieser Schicht wird die Steuerung des Datenflusses zwischen den beteiligten Komponenten eines Systems koordiniert. Dazu zählen beispielsweise die Übertragung von Bilddaten zwischen einem Kamerasensor und einem Prozessor oder SoC. Dabei werden eingehende Daten verarbeitet, verwaltet und an nachgelagerte Systemkomponenten weitergeleitet [28, 29, 31].

Transportschicht

Diese Schicht definiert die Regeln für den Austausch von Daten zwischen den Systemkomponenten. Dazu zählen beispielsweise, wie Datenpakete aufgebaut sind, wie Fehler erkannt werden und wie die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger organisiert wird. Beispiele hierfür sind Protokolle wie MIPI CSI-2 (Camera Serial Interface) für Kameras oder MIPI DSI-2 (Display Serial Interface) für Displays [29, 31].

Physikalische Schicht

Die physikalische Schicht ist für die tatsächliche Signalübertragung zwischen den Hardwarekomponenten verantwortlich. Sie stellt sicher, dass elektrische Signale zuverlässig über die physikalische Verbindung übertragen werden können. In MIPI-Systemen erfolgt diese Signalübertragung typischerweise über Hochgeschwindigkeitsschnittstellen wie z.B. C-PHY (Compact Physical) oder D-PHY (Differential Physical) [29].

Durch die OSI-Schichtmodell-basierte Struktur kann jede Schicht unabhängig entwickelt oder optimiert werden, ohne die Funktionsweise der übrigen Schichten zu beeinflussen. Die geschichtete Architektur ermöglicht somit eine leistungsfähige und robuste Kommunikation zwischen unterschiedlichen Systemkomponenten und trägt wesentlich zur hohen Leistungsfähigkeit moderner MIPI-basierter Geräte bei [29–31].

2.4.3 Protokollstandards

Innerhalb des MIPI-Ökosystems existieren mehrere Protokollstandards, die jeweils für unterschiedliche Anwendungen definiert wurden. Zu den wichtigsten zählen unter anderem MIPI CSI-2 für Kamerasensoren, MIPI DSI-2 für Displays und weitere Standards für Sensor- und Datenkommunikation innerhalb eingebetteter Systeme. Diese Protokollstandards gewährleisten eine kompatible Kommunikation zwischen verschiedenen Komponenten eines Systems und ermöglichen eine effiziente und zuverlässige Datenübertragung zwischen den beteiligten Hardwareelementen. Besonders weit verbreitet ist der Kamera-Standard CSI-2, der häufig für Bildsensoren in eingebetteten Systemen verwendet wird und hohe Auflösungen sowie hohe Datenraten unterstützt [31].

2.4.4 Physische Schnittstellen

Zwei der wichtigsten physikalischen Implementierungen im MIPI-Ökosystem sind MIPI D-PHY und MIPI C-PHY. Diese unter anderem von den Protokollen CSI-2 und DSI-2 verwendet werden [29–32].

Die MIPI D-PHY ist die am weitesten verbreitete physikalische Schnittstelle innerhalb des MIPI-Standards. Sie basiert auf einer differenziellen Signalübertragung mit paarweise geführten Datenleitungen sowie einer separaten Taktsignalleitung zur Synchronisation. Die Konfiguration erfolgt über einen I2C-Datenbus (Inter-Integrated Circuit). Durch diese Struktur sind Datenraten von bis zu etwa 2,5 Gbit/s pro Lane möglich. Aufgrund ihrer weiten

Verbreitung wird D-PHY insbesondere in Kameras und Displays mobiler Geräte eingesetzt (Abbildung 11) [29–33].

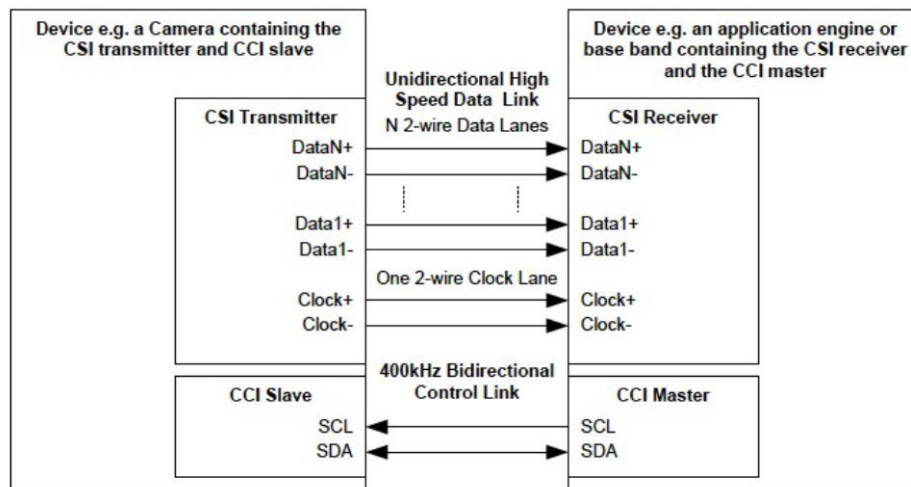


Abbildung 11 CSI Interface mit D-PHY-Verbindung [32, S. 2]

Eine alternative physikalische Implementierung stellt die MIPI C-PHY dar. Im Gegensatz zur D-PHY verwendet sie dreipolige Leitungseinheiten (Trios) und integriert den Takt direkt in die Datenübertragung. Durch die 3-Phasen-Codierung werden eine höhere Bandbreite sowie eine reduzierte Pinanzahl erreicht, wobei Datenraten von bis zu etwa 50 Gbit/s pro Trio möglich sind (Abbildung 12). Aufgrund der höheren Übertragungseffizienz eignet sich C-PHY insbesondere für hochauflösende Kamerasysteme und moderne Displays, während D-PHY weiterhin als etablierter Standard für viele Anwendungen gilt[29–32].

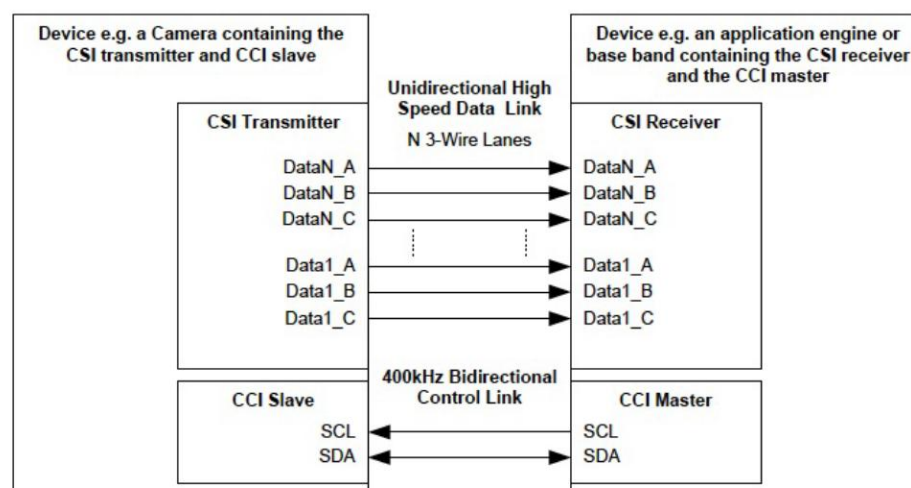


Abbildung 12 CSI Interface mit C-PHY-Verbindung [32, S. 2]

2.5 Universal Serial Bus

Der Universal Serial Bus (USB) ist ein standardisiertes Kommunikationssystem zur Verbindung von Peripheriegeräten mit Computersystemen. Ziel der Einführung war die Bereitstellung einer einheitlichen Schnittstelle zur Vereinfachung der Geräteintegration durch automatische Erkennung und Konfiguration. Die Standardisierung erfolgt durch das USB Implementers Forum. Aufgrund seiner hohen Verbreitung und breiten Betriebssystemunterstützung hat sich USB als zentrale Schnittstelle für zahlreiche Anwendungen etabliert, darunter Eingabegeräte, Speichermedien und Kameras [34, 35].

2.5.1 Funktionsweise

Die USB-Architektur basiert auf einem Host-zentrierten Kommunikationsmodell. Dabei steuert ein Host-System, beispielsweise ein Computer oder ein eingebettetes System, den gesamten Datenverkehr auf dem Bus. Angeschlossene Geräte reagieren ausschließlich auf Anfragen des Hosts und initiieren selbst keine Kommunikation. Die physische Struktur eines USB-Systems ist topologisch als eine Baumstruktur aufgebaut, wie in Abbildung 13 dargestellt ist. Sie besteht aus einem Host-Controller, optionalen USB-Hubs sowie den angeschlossenen Endgeräten. Hubs ermöglichen dabei die Erweiterung eines einzelnen USB-Ports auf mehrere Anschlüsse, wodurch mehrere Geräte gleichzeitig an einem Host betrieben werden können [7, 34].

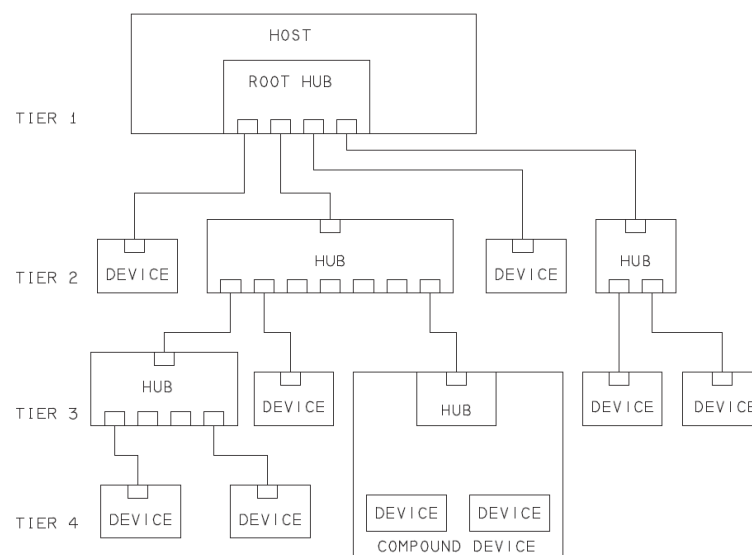


Abbildung 13 Topologie eines USB-Systems [34, S. 16]

Ein wesentliches Merkmal des USB-Standards ist die automatische Geräteerkennung, die als Plug-and-Play-Funktionalität bezeichnet wird. Wird ein Gerät angeschlossen, erkennt der Host dessen Vorhandensein und startet einen Enumerationsprozess. In diesem Prozess liest der Host verschiedene Geräteinformationen aus Deskriptoren aus. Diese enthalten unter anderem Angaben über den Gerätetyp, den Hersteller sowie über unterstützte Funktionen und Kommunikationsparameter. Auf Grundlage dieser Informationen kann das Betriebssystem einen geeigneten Treiber auswählen und das Gerät in das System integrieren. Für die Datenübertragung definiert der USB-Standard verschiedene Transferarten, die auf unterschiedliche Anforderungen zugeschnitten sind. Dazu zählen die Control-Transfers zur Gerätekonfiguration und Steuerung, die Bulk-Transfers für große Datenmengen ohne feste zeitliche Anforderungen, die Interrupt-Transfers für kleine, regelmäßig abgefragte Datenpakete und die Isochronen Transfers für kontinuierliche Datenströme. Diese unterschiedlichen Übertragungsmodi ermöglichen eine flexible Nutzung des USB-Busses für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen [34].

2.5.2 Geräteklassen

Zur Standardisierung der Kommunikation zwischen Host-Systemen und verschiedenen Gerätetypen definiert der USB-Standard sogenannte USB-Geräteklassen. Eine Geräteklasse beschreibt ein standardisiertes Kommunikationsprotokoll für eine bestimmte Kategorie von Geräten. Durch diese Klassifizierung können Betriebssysteme generische Klassentreiber bereitstellen, wodurch viele Geräte ohne herstellerspezifische Treiber betrieben werden können. Dies vereinfacht sowohl die Integration neuer Geräte als auch die herstellerunabhängige Kommunikation zwischen Geräten unterschiedlicher Hersteller. Zu den USB-Geräteklassen gehören unter anderem die Human Interface Device Class für Eingabegeräte wie Tastaturen oder Mäuse, die Mass Storage Class für Speichermedien wie USB-Sticks oder externe Festplatten, die Audio Class für Audiogeräte, die Communication Device Class für Kommunikationsschnittstellen sowie die Video Class für Kameras und Videogeräte [34, 36].

2.5.3 USB Video Class

Die USB Video Class (UVC) stellt eine standardisierte Geräteklasse für Videogeräte dar, die über eine USB-Schnittstelle betrieben werden. Sie wird insbesondere von Webcams, Kameramodulen oder Video-Capture-Geräten verwendet. Die UVC-Spezifikation definiert

ein einheitliches Protokoll zur Übertragung von Videodaten sowie zur Steuerung kamerabezogener Parameter. Zu diesen Parametern zählen beispielsweise die Bildauflösung, die Bildrate sowie verschiedene Kameraeinstellungen wie Helligkeit, Kontrast oder Fokus. Die Übertragung der Videodaten erfolgt in der Regel über isochrone Transfers, da diese eine kontinuierliche Datenübertragung mit garantierter Bandbreite ermöglichen. Dadurch eignet sich die UVC-Klasse insbesondere für Anwendungen mit Echtzeitanforderungen, beispielsweise Videoaufnahmen oder Video-Streaming [34, 36].

2.5.4 On-The-Go

Die ursprüngliche USB-Standards 1.0/1.1 sehen eine feste Rollenverteilung zwischen Host und Gerät vor. In bestimmten Anwendungen ist jedoch eine flexiblere Nutzung der Schnittstelle erforderlich. Zu diesem Zweck wurde die Erweiterung USB On-The-Go (OTG) entwickelt. USB OTG ermöglicht es seit dem Standard USB 2.0 einem Gerät, sowohl die Rolle eines Hosts als auch die eines Peripheriegeräts zu übernehmen. Die jeweilige Rolle kann abhängig vom angeschlossenen Gerät dynamisch wechseln. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist ein Smartphone, das entweder mit einem Computer verbunden wird und dabei als USB-Gerät fungiert oder selbst als Host arbeitet, um beispielsweise einen USB-Speicherstick oder eine Tastatur anzusteuern. Die Aushandlung der Rollen erfolgt über spezielle Protokollmechanismen sowie über zusätzliche Signale innerhalb der USB-Steckverbindung. Dadurch kann automatisch bestimmt werden, welches der verbundenen Geräte die Host-Funktion übernimmt. USB OTG findet deshalb insbesondere in mobilen Geräten, Embedded-Systemen sowie in Single-Board-Computern Anwendung, bei denen eine flexible Nutzung der USB-Schnittstelle erforderlich ist [34].

2.5.5 Steckertypen

Für die physische Verbindung von Geräten definiert der USB-Standard verschiedene Steckertypen und Buchse, die sich hinsichtlich ihrer Bauform, Größe und Einsatzbereiche unterscheiden. Ziel dieser unterschiedlichen Steckertypen ist es, die mechanischen Anforderungen verschiedener Geräteklassen zu erfüllen und gleichzeitig eine eindeutige Rollenverteilung zwischen Host und Device zu unterstützen [34].

Der erste Steckertyp ist der USB-A-Stecker. Dieser wird typischerweise auf der Host-Seite verwendet, beispielsweise an Computern oder USB-Hubs. Der USB-A-Stecker besitzt eine rechteckige Bauform und ist mechanisch so gestaltet, dass er nur in einer Orientierung

eingesteckt werden kann. Geräte wie Tastaturen, Mäuse oder USB-Speichersticks verwenden häufig einen USB-A-Stecker auf der Host-Seite der Verbindung. Der andere Steckertyp ist der USB-B-Stecker. Im Gegensatz zum USB-A-Stecker befindet sich der USB-B-Stecker häufig an Peripheriegeräten wie Druckern, Scannern oder anderen externen Geräten. Der USB-B-Stecker besitzt eine nahezu quadratische Bauform mit leicht abgeschrägten oberen Kanten. Diese mechanische Gestaltung verhindert ein falsches Einstecken und sorgt gleichzeitig dafür, dass der Steckertyp eindeutig der Geräteseite zugeordnet werden kann. Durch diese klare mechanische Trennung zwischen USB-A auf der Host-Seite und USB-B auf der Geräte-Seite wird eine fehlerhafte Verbindung zweier Hosts miteinander vermieden. In der Abbildung 14 sind die gerade beschriebenen Steckertypen am Beispiel des USB-Standards 2.0 dargestellt [34].

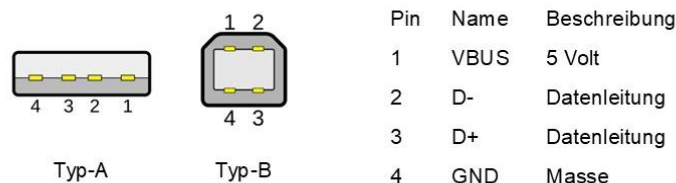


Abbildung 14 USB 2.0 Typ-A und Typ-B Stecker nach [37–39]

Für kompakte und mobile Geräte wurden kleinere Steckertypen entwickelt. Beispiele für die Anwendung wären unter anderem Smartphones, Kameras oder Embedded-Systeme. Die Mini- und Micro-USB-Stecker zeichnen sich durch deutlich kleinere Bauformen im Vergleich zu USB-A und USB-B aus. Dabei ist der Micro-Standard nochmals kleiner als der Mini-Standard. Bei OTG-fähigen Verbindungen spielt zusätzlich der sogenannte ID-Pin eine Rolle, über den die Host- beziehungsweise Geräte-Rolle zwischen zwei Geräten bestimmt werden kann. In der Abbildung 15 sind die gerade beschriebenen Steckertypen am Beispiel des USB-Standards 2.0 dargestellt. Die Wahl des Steckertyps hängt somit sowohl von den mechanischen Anforderungen eines Gerätes als auch von der vorgesehenen Rolle innerhalb der USB-Kommunikation ab [34].

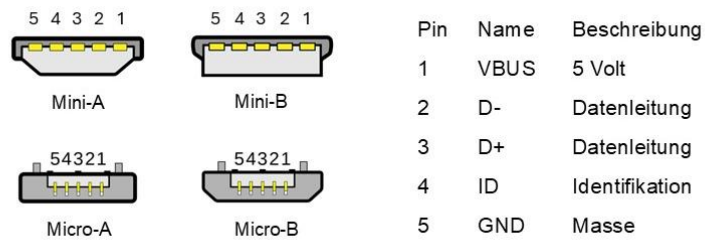


Abbildung 15 USB 2.0 Mini-A/-B und Micro-A/-B Stecker nach [39–43]

2.5.6 Stromversorgung

Neben der Datenübertragung wird der USB-Standard auch zur Stromversorgung von Geräten genutzt. Bereits ab USB-Standard 1.0 war vorgesehen, angeschlossene Geräte direkt über die USB-Schnittstelle mit elektrischer Energie zu versorgen. Dadurch können Peripheriegeräte ohne separate Stromversorgung betrieben werden. Die Stromversorgung erfolgt über zwei dedizierte Adern innerhalb des USB-Kabels, eine Versorgungsleitung und eine Masseleitung [34, 44]. Die elektrischen Parameter für ausgewählte Standards sind in Tabelle 3 dargestellt.

Standard	Spannung U in [V]	Verfügbare Stromstärke I in [mA]	Verfügbare Leistung P in [W]
USB 1.0/1.1	5	0,1	0,5
USB 2.0		0,5	2,5
USB 3.0/3.1		0,9	4,5

Tabelle 3 Elektrische Parameter verschiedener USB-Standards nach [34, S. 377, 44]

Durch diese Eigenschaften hat sich USB nicht nur als Datenschnittstelle, sondern auch als universeller Standard für die Stromversorgung elektronischer Geräte etabliert. Viele mobile Geräte, Embedded-Systeme und Peripheriegeräte können daher vollständig über eine USB-Verbindung betrieben oder geladen werden [34, 35, 44].

3 Methodik

3.1 V-Modell

Zur strukturierten Planung und Umsetzung des im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelten Referenzaufbaus wurde das Vorgehensmodell des V-Modells herangezogen. Das V-Modell stellt ein etabliertes Entwicklungsmodell in der System- und Softwaretechnik dar und dient der systematischen Strukturierung komplexer Entwicklungsprozesse. Ein wesentliches Merkmal dieses Modells ist die enge Zuordnung zwischen einzelnen Entwicklungsphasen und den dazugehörigen Verifikations- und Validierungsschritten. Die Bezeichnung des Modells leitet sich von der charakteristischen V-förmigen Darstellung der Entwicklungs- und Testphasen ab. Die linke Seite des Modells beschreibt die schrittweise Spezifikation und Detaillierung eines Systems, beginnend bei den übergeordneten Anforderungen bis hin zur konkreten Implementierung einzelner Systemkomponenten. Dieser Prozess kann auch als Entwurfsprozess bezeichnet werden. Die rechte Seite des Modells bildet die korrespondierenden Prüf- und Testphasen ab, in denen überprüft wird, ob die im jeweiligen Entwicklungsschritt definierten Anforderungen erfüllt wurden (Abbildung 16) [45–49].

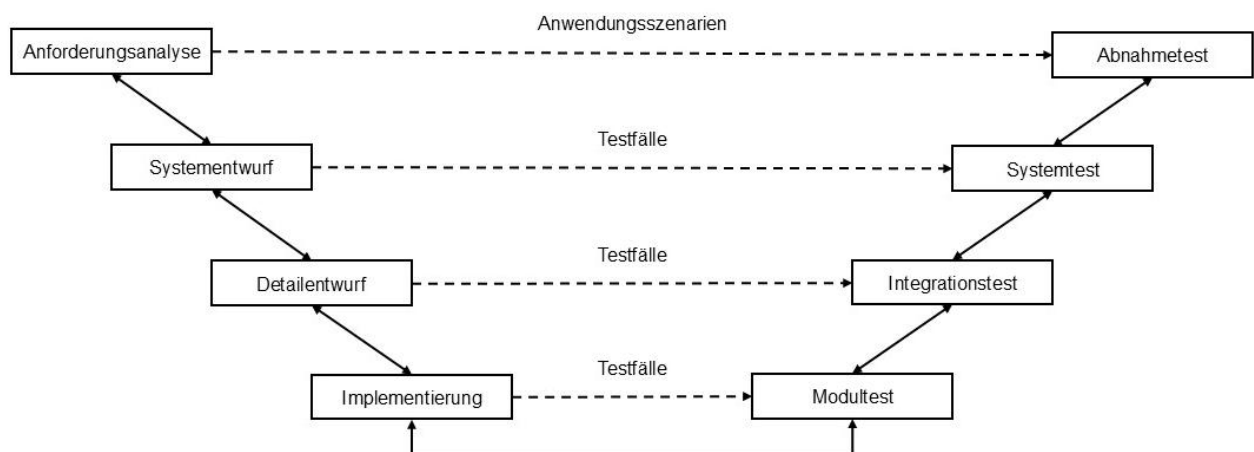


Abbildung 16 Grundstruktur des V-Modell nach [48, 434 ff.]

Der Entwicklungsprozess beginnt in der Regel mit der Anforderungsanalyse, in der die funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen an das zu entwickelnde System systematisch erfasst und dokumentiert werden. Darauf aufbauend erfolgt der Systementwurf, bei dem das

Gesamtsystem in logisch zusammenhängende Teilsysteme oder Funktionsblöcke strukturiert wird. Ziel dieser Phase ist die Definition einer geeigneten Systemarchitektur sowie die Festlegung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten. Im anschließenden Detailentwurf werden die zuvor definierten Systemkomponenten weiter spezifiziert. Dies umfasst unter anderem die Auswahl geeigneter Technologien und Bauelemente sowie die detaillierte Ausarbeitung der jeweiligen Funktionsblöcke. Am unteren Punkt des V-Modells befindet sich die Implementierungsphase, in der die zuvor spezifizierten Komponenten konkret realisiert werden. An die Implementierung schließen sich auf der rechten Seite des Modells die entsprechenden Test- und Integrationsphasen an. Zunächst werden im Rahmen von Modultests einzelne Komponenten isoliert auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft. Anschließend erfolgt im Integrationstest die schrittweise Zusammenführung der einzelnen Komponenten, wobei insbesondere das Zusammenspiel der definierten Schnittstellen untersucht wird. Darauf aufbauend wird im Systemtest das vollständige System hinsichtlich der zuvor definierten Systemanforderungen überprüft. Den Abschluss bildet die Validierung, bei der beurteilt wird, ob das entwickelte System die ursprünglich formulierten Anforderungen und Zielsetzungen erfüllt [45–49].

Ein zentraler Vorteil des V-Modells besteht darin, dass zu jeder Entwicklungsphase bereits frühzeitig entsprechende Teststrategien definiert werden. Dadurch wird eine nachvollziehbare Verifikation der Entwicklungsschritte ermöglicht und potenzielle Fehler können bereits in frühen Projektphasen erkannt werden [45–49].

3.2 Anwendung des V-Modells auf die Entwicklung des Referenzaufbaus

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das V-Modell in angepasster Form auf die Entwicklung eines Referenzaufbaus angewendet. Im Gegensatz zu einer klassischen Hardwareentwicklung lag der Fokus hier auf der Auswahl geeigneter, kommerziell verfügbarer Einzelkomponenten und deren Integration zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem.

Beginnend mit dem linken Zweig des V-Modells, welcher auch als Konzeption bezeichnet wird, erfolgte eine Anforderungsdefinition für den Referenzaufbau. Dabei wurden die funktionalen und technischen Anforderungen an das Gesamtsystem sowie relevante Randbedingungen festgelegt. Dazu zählen beispielsweise elektrische Kenngrößen, notwendige Schnittstellen, mechanische Rahmenbedingungen sowie Anforderungen an Messbarkeit,

Erweiterbarkeit oder Betriebssicherheit. Darauf aufbauend wurde im Systementwurf die grundlegende Struktur des Referenzaufbaus definiert. Hierbei wurde das Gesamtsystem in funktionale Teilbereiche gegliedert, beispielsweise Energieversorgung, Signalverarbeitung, Steuerung sowie Ein- und Ausgabeschnittstellen. Für jeden dieser Funktionsbereiche wurden mögliche Lösungsansätze identifiziert und geeignete Kategorien von Komponenten bestimmt. Im anschließenden Detailentwurf erfolgte die konkrete Auswahl der benötigten Hardwarekomponenten. Dazu gehörten die Recherche und Bewertung geeigneter, am Markt verfügbarer Bauteile und Module anhand der zuvor definierten Anforderungen. Kriterien für die Auswahl waren unter anderem technische Spezifikationen, Kompatibilität der Schnittstellen, Verfügbarkeit, Dokumentation sowie Integrationsaufwand. Auf dieser Grundlage wurde der vollständige Referenzaufbau konzeptionell festgelegt und die Verschaltung bzw. Verbindung der einzelnen Komponenten definiert. Die Implementierungsphase bestand anschließend im praktischen Aufbau des Referenzsystems. Die ausgewählten Komponenten wurden physisch miteinander verbunden, elektrisch integriert und für den gemeinsamen Betrieb konfiguriert. Dazu gehörte beispielsweise das Herstellen der erforderlichen Verdrahtungen, die Inbetriebnahme der einzelnen Geräte sowie die Durchführung erster Funktionsprüfungen. Entsprechend der rechten Seite des V-Modells, welche auch als Integration bezeichnet wird, wurden anschließend verschiedene Test- und Verifikationschritte durchgeführt. Zunächst wurden einzelne Komponenten beziehungsweise Funktionsbereiche separat geprüft, um deren korrekte Funktion im vorgesehenen Einsatzkontext sicherzustellen. Anschließend erfolgte die schrittweise Integration der Komponenten zum vollständigen Referenzaufbau. Abschließend wurde das Gesamtsystem getestet und bewertet, um zu überprüfen, ob die definierten Anforderungen hinsichtlich Funktionalität, Stabilität und Systemverhalten erfüllt werden. Durch diese an das Projekt angepasste Anwendung des V-Modells konnte der Aufbau des Referenzsystems systematisch geplant, dokumentiert und schrittweise validiert werden.

4 Anforderungsanalyse

Die vorliegende Anforderungsanalyse bildet die Grundlage für die weitere Systementwicklung. Sie dient der strukturierten Erfassung der Anforderungen an das zu entwickelnde System und stellt sicher, dass die spätere Umsetzung zielgerichtet und nachvollziehbar erfolgt. Dabei werden sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen definiert sowie Randbedingungen, Schnittstellen und Qualitätskriterien beschrieben.

4.1 Systemübersicht

Ziel des Systems ist die Realisierung einer drahtlosen Übertragungsstrecke für ein analoges Videosignal. Das Gesamtsystem besteht nach Kapitel 5.3 aus folgenden Hauptkomponenten:

- Kamera mit analogem Videoausgang
- Funksender zur drahtlosen Übertragung
- Funkempfänger zur Signalrekonstruktion
- Verarbeitungseinheit zur Digitalisierung
- Schnittstelle zur Anbindung an einen Rechner

Das System soll ein kontinuierliches Videosignal von einer Kamera erfassen, per Funk übertragen und auf einem Rechner nutzbar machen.

4.2 Systemabgrenzung

Die Systemabgrenzung dient der klaren Festlegung des Betrachtungsumfangs sowie der Trennung zwischen Systembestandteilen und externen Komponenten. Zum betrachteten System gehören alle Komponenten, die zur Erfassung, Übertragung, Verarbeitung und Ausgabe des Videosignals erforderlich sind. Dies umfasst insbesondere die Verarbeitung eines analogen Videosignals als CVBS, die drahtlose Übertragung mittels geeigneter Funktechnik, den Empfang und die Rekonstruktion des Signals sowie dessen Digitalisierung. Weiterhin ist die Bereitstellung einer Schnittstelle Bestandteil des Systems, über die das Videosignal einem Rechner zugeführt wird und dort als standardkonforme Videoquelle (z. B.

Webcam) genutzt werden kann. Nicht Bestandteil des Systems sind hingegen alle nachgelagerten Funktionen auf Seiten des Rechners. Ebenso ist die konkrete mechanische Integration des Systems in eine Datenbrille, nicht Gegenstand dieser Arbeit.

4.3 Anspruchsgruppen

Im Rahmen dieser Arbeit werden die relevanten Anspruchsgruppen sowie externen Einflussfaktoren betrachtet, die Anforderungen an das zu entwickelnde System stellen oder dessen Auslegung maßgeblich beeinflussen. Aufgrund des Charakters der Arbeit als Referenzaufbau ergibt sich eine reduzierte, jedoch klar definierte Struktur dieser Anspruchsgruppen.

Die zentrale Anspruchsgruppe ist der Auftraggeber in Form des betreuenden Hochschulprofessors Prof. Dr.-Ing. Rigo Herold der Westsächsischen Hochschule Zwickau (WHZ). Dieser definiert die Zielsetzung der Arbeit, insbesondere die Konzeption, Realisierung und Evaluierung des funktionsfähigen Referenzaufbaus. Hieraus ergeben sich Anforderungen an die methodische Vorgehensweise, die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sowie die praktische Umsetzbarkeit.

Eine weitere Rolle nimmt der Entwickler ein. Durch Ihn werden Anforderungen hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit unter Verwendung verfügbarer Bauelemente sowie der Umsetzung als Laboraufbau festgelegt. Ergänzend sind Aspekte wie Testbarkeit und Modularität zu berücksichtigen.

Ein direkter Anwenderkreis ist nicht vorgesehen, da das System als Referenzplattform für weiterführende Untersuchungen dient. Dennoch lassen sich aus potenziellen zukünftigen Einsatzszenarien indirekte Anforderungen ableiten.

4.4 Randbedingungen

Die Entwicklung des Systems unterliegt technischen und regulatorischen Randbedingungen, die bei der Konzeption sowie Realisierung zu berücksichtigen sind. Eine zentrale Randbedingung ergibt sich aus den Vorgaben für den Betrieb von Funkanlagen. Da das System eine drahtlose Übertragung vorsieht, dürfen ausschließlich zulässige Frequenzbereiche genutzt werden. Die Nutzung des Frequenzspektrums wird in Deutschland durch die BNetzA geregelt. Eine weitere Randbedingung ergibt sich aus der Zielsetzung als Referenzaufbau.

Das System soll unter Verwendung marktverfügbarer Bauelemente realisiert werden, um eine nachvollziehbare und reproduzierbare Umsetzung zu gewährleisten.

4.5 Anforderungen

4.5.1 Funktionale Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen beschreiben die vom System zu erfüllenden Kernfunktionen. Sie definieren, welche Aufgaben das System aus Anwendersicht ausführen muss, ohne dabei konkrete technische Lösungen vorzugeben. Die nachfolgend aufgeführten Anforderungen ergeben sich direkt aus der Zielsetzung der Arbeit sowie der vorgesehenen Systemarchitektur (Tabelle 4).

Identifikation	Anforderung	Anspruchsgruppe
FA-01	Das System muss ein analoges Videosignal im CVBS erfassen können.	Auftraggeber
FA-02	Das System muss das erfasste Videosignal drahtlos übertragen können.	Auftraggeber
FA-03	Das System muss das übertragene Signal empfangen und rekonstruieren.	Auftraggeber
FA-04	Das System muss das empfangene analoge Signal digitalisieren.	Auftraggeber
FA-05	Das System muss das digitalisierte Videosignal über eine geeignete Schnittstelle an einen Rechner übertragen.	Auftraggeber
FA-06	Das System muss vom Rechner als standardkonformes Videogerät erkannt werden.	Auftraggeber

Tabelle 4 Funktionale Anforderungen

4.5.2 Nicht-funktionale Anforderungen

Neben den funktionalen Anforderungen sind nicht-funktionale Anforderungen von zentraler Bedeutung, da sie qualitative Eigenschaften des Systems beschreiben. Diese betreffen insbesondere Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit, technische Rahmenbedingungen sowie

Schnittstellen und beeinflussen maßgeblich die Systemauslegung. Diese sind in Tabelle 5 dargestellt.

Identifikation	Anforderung	Anspruchsgruppe
NFA-01	Die Übertragung soll mit möglichst geringer Verzögerung erfolgen, sodass eine quasi-echtzeitfähige Darstellung gewährleistet ist.	Auftraggeber/ Anwender
NFA-02	Die drahtlose Übertragung soll eine Mindestreichweite von TBD Metern ermöglichen.	Auftraggeber
NFA-03	Das System soll eine stabile Übertragung ohne signifikante Unterbrechungen oder Bildausfälle gewährleisten.	Auftraggeber/ Anwender
NFA-04	Das übertragene Videosignal soll möglichst störarm und artefaktfrei dargestellt werden.	Anwender
NFA-05	Das System soll mit marktverfügbaren und dokumentierten elektronischen Bauelementen realisierbar sein.	Auftraggeber/ Entwickler
NFA-06	Das System soll als Referenzaufbau mit vertretbarem Aufwand implementierbar sein.	Entwickler
NFA-07	Die Stromversorgung des Systems auf Senderseite soll mit einer Versorgungsspannung von 5 V erfolgen.	Auftraggeber/ Entwickler
NFA-08	Die Komponenten auf der Sendeseite sollen in den Abmessungen so gewählt sein, dass eine spätere Integration an eine Datenbrille möglich ist.	Auftraggeber/ Entwickler
NFA-09	Die Schnittstelle zum Rechner muss eine standardisierte Erkennung als Videogerät ermöglichen.	Auftraggeber/ Anwender

Tabelle 5 Nichtfunktionelle Anforderungen

4.5.3 Systemanforderungen

Die Systemanforderungen stellen eine Zusammenführung und Konkretisierung der zuvor definierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen dar. Sie beschreiben das

Systemverhalten auf einer übergeordneten Ebene und dienen als Grundlage für die Systemarchitektur sowie die spätere Verifikation (Tabelle 6).

Identifikation	Anforderung	Anspruchsgruppe
SA-01	Das System muss ein CVBS verarbeiten können.	Auftraggeber
SA-02	Das System muss eine drahtlose Übertragung unter Verwendung zulässiger Frequenzbereiche ermöglichen.	BNetzA
SA-03	Das System muss eine stabile Videoübertragung über eine definierte Distanz gewährleisten.	Auftraggeber/ Anwender
SA-04	Das System muss eine digitale Ausgabe bereitstellen, die eine Nutzung als Videogerät an einem Rechner ermöglicht.	Auftraggeber
SA-05	Das System muss mit verfügbaren elektronischen Komponenten als funktionsfähiger Laboraufbau realisierbar sein.	Entwickler

Tabelle 6 Systemanforderungen

4.6 Verifikationsmethoden

Zur Überprüfung der definierten Anforderungen werden geeignete Verifikationsmethoden festgelegt. Dabei werden mehrere Anforderungen jeweils durch gemeinsame Methoden verifiziert, um eine strukturierte und effiziente Bewertung des Systems zu ermöglichen.

4.6.1 Funktionale Tests

Funktionale Tests dienen dem Nachweis der grundlegenden Systemfunktionen im Betrieb. Durch die Durchführung von Funktionstests wird überprüft, ob das System das Videosignal erfassen, drahtlos übertragen, empfangen, digitalisieren und über die definierte Schnittstelle an einen Rechner ausgeben kann. Zusätzlich wird die korrekte Erkennung als Videogerät überprüft.

Verifizierte Anforderungen:

FA-01, FA-02, FA-03, FA-04, FA-05, FA-06, NFA-09, SA-01, SA-04

4.6.2 Analyse der Systemauslegung

Die Analyse der Systemauslegung dient der Überprüfung konzeptioneller und regulatorischer Anforderungen. Die eingesetzten Komponenten sowie die Systemauslegung werden hinsichtlich Verfügbarkeit, Dokumentation und Einhaltung regulatorischer Vorgaben analysiert.

Verifizierte Anforderungen:

NFA-05, NFA-08, SA-02

4.6.3 Analyse der Implementierung

Die Analyse der Implementierung dient dem Nachweis der Realisierbarkeit des Gesamtsystems. Durch den Aufbau und die erfolgreiche Inbetriebnahme des Systems wird die technische Umsetzbarkeit unter den gegebenen Randbedingungen überprüft.

Verifizierte Anforderungen:

NFA-06, NFA-07, SA-05

4.6.4 Analyse des Übertragungsverhaltens

Die Analyse des Übertragungsverhaltens dient der qualitativen Beurteilung der Signalübertragung. Durch Beobachtung des Systems unter variierenden Bedingungen werden Reichweite, Stabilität sowie die Bildqualität bewertet. Dies erfolgt durch eine visuelle Beurteilung des am Rechner angezeigten Videos.

Verifizierte Anforderungen:

NFA-01, NFA-02, NFA-03, NFA-04, SA-03

4.7 Offene Punkte und Annahmen

Im Rahmen der Anforderungsanalyse konnten nicht alle Systemparameter eindeutig aus den gegebenen Vorgaben abgeleitet werden. Aufgrund der explorativen Zielsetzung der Arbeit als Referenzaufbau ergeben sich mehrere offene Punkte, die im weiteren Verlauf konkretisiert werden müssen. Dazu zählen primär die folgenden aufgeführten Punkte:

Übertragungsparameter

- erforderliche Reichweite
- angestrebte Bildqualität

Funktechnische Auslegung

- Auswahl des Frequenzbereichs
- Festlegung der Sendeleistung

Systemintegration

- Schnittstellen
- Baugröße und Aufbauform

5 Systementwurf

Aufbauend auf der durchgeführten Anforderungsanalyse wird im vorliegenden Kapitel ein Systementwurf für die Realisierung einer analogen Funk-Video-Übertragungsstrecke entwickelt. Ziel ist die Ableitung einer konsistenten Systemarchitektur, welche die definierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen erfüllt und zugleich die gegebenen technischen sowie regulatorischen Randbedingungen berücksichtigt.

Im Sinne des V-Modells stellt der Systementwurf die Verfeinerung der Systemanforderungen (vgl. Kapitel 4.5) dar und bildet die Grundlage für den anschließenden Detailentwurf. Dabei erfolgt eine strukturierte Zerlegung des Gesamtsystems in funktionale Teilsysteme sowie die Festlegung zentraler Entwurfsentscheidungen. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass die gewählte Architektur eine spätere Verifikation der Anforderungen ermöglicht.

5.1 Ableitung der Systemarchitektur aus den Anforderungen

Die in Kapitel 4.5.1 definierten funktionalen Anforderungen beschreiben eine vollständige Signalverarbeitungskette von der Erfassung bis zur Ausgabe eines Videosignals. Somit ergeben sich aus den Anforderungen FA-01 bis FA-06 folgende notwendige Systemfunktionen:

- Erfassung eines analogen Videosignals im CVBS-Format (FA-01)
- Drahtlose Übertragung des Signals (FA-02)
- Empfang und Rekonstruktion des Signals (FA-03)
- Digitalisierung des Videosignals (FA-04)
- Übergabe an einen Rechner (FA-05)
- Erkennung als standardkonformes Videogerät (FA-06)

Diese funktionale Kette wird durch die Systemanforderungen weiter abstrahiert. So fordert beispielsweise SA-02 die Nutzung zulässiger Frequenzbereiche. Darüber hinaus beeinflussen die nicht-funktionale Anforderungen maßgeblich die Systemarchitektur. Die Forderung nach geringer Latenz (NFA-01) sowie stabiler Übertragung (NFA-03) begünstigt eine analoge Übertragung ohne zusätzliche digitale Codierung. Gleichzeitig erfordert NFA-05 die

Verwendung marktverfügbarer Komponenten, was die Nutzung etablierter Systemlösungen nahelegt. Aus der Kombination dieser Anforderungen ergibt sich eine lineare, möglichst verlustarme Signalverarbeitungskette mit minimaler Systemkomplexität.

5.2 Herleitung der Systemarchitektur anhand von Referenzsystemen

Zur Auslegung der Systemarchitektur wird auf etablierte Referenzsysteme zurückgegriffen, wie sie im Bereich des Modellbaus, insbesondere bei sogenannten FPV-Systemen (First-Person-View), eingesetzt werden. Diese Systeme ermöglichen die drahtlose Übertragung analoger Videosignale in Echtzeit da solche Systeme die Anforderungen an geringe Latenz (NFA-01) erfüllen. Außerdem zeichnen sie sich durch stabile Übertragung (NFA-03) sowie einfache Realisierbarkeit (NFA-05) aus [50, 51]. Typische FPV-Systeme bestehen aus einer analogen Kamera, einem kompakten Videosender (VTX), einer Funkübertragungsstrecke im ISM-Band, einem Videoempfänger (VRX) und einer Anzeigeeinheit oder Videoverarbeitung. Aus diesen Gründen erfolgt eine Übertragung dieses etablierten Architekturprinzips auf den vorliegenden Anwendungsfall. So lässt sich eine bewährte und technisch robuste Systemstruktur übernehmen.

5.3 Systemarchitektur des Gesamtsystems

Auf Basis der Anforderungen sowie der Referenzsysteme wird das Gesamtsystem in die in Abbildung 17 dargestellten funktionalen Teilsysteme gegliedert.

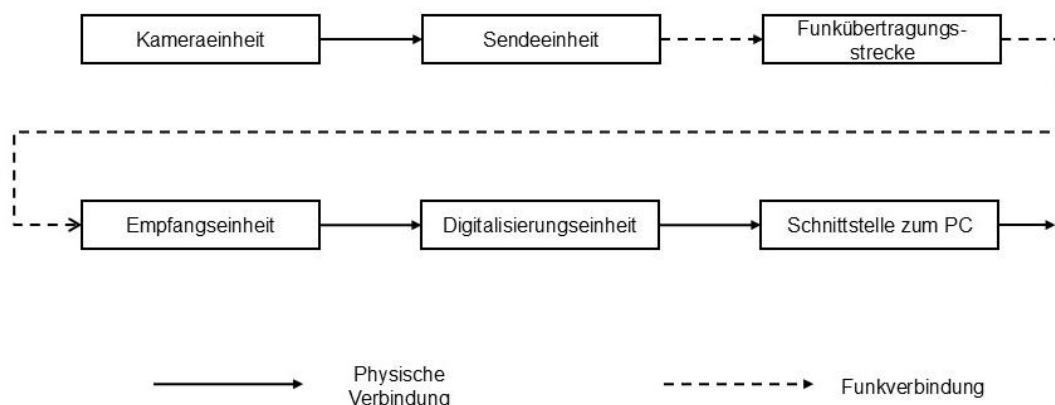


Abbildung 17 Darstellung der Systemarchitektur nach [50, 51]

Diese Architektur folgt einer sequenziellen Signalverarbeitung:

- Die Kamera erzeugt ein analoges CVBS-Signal.
- Die Sendeeinheit moduliert dieses Signal auf einen HF-Träger.
- Die Übertragung erfolgt drahtlos über die Funkstrecke.
- Die Empfangseinheit demoduliert das Signal und stellt es erneut als analoges Videosignal bereit.
- Die Digitalisierungseinheit wandelt das Signal in ein digitales Format.
- Über die Schnittstelle wird das Signal dem Rechner zur Verfügung gestellt.

Diese Struktur gewährleistet eine direkte Umsetzung der funktionalen Anforderungen FA-01 bis FA-05 sowie der Systemanforderungen SA-01 und SA-04. Die modulare Aufteilung ermöglicht zudem eine klare Zuordnung von Funktionen zu Systemkomponenten und unterstützt die in NFA-06 geforderte Realisierbarkeit als Laboraufbau.

5.4 Beschreibung der Subsysteme

5.4.1 Kameraeinheit

Die Kameraeinheit stellt die Quelle des Videosignals dar und liefert ein CVBS. Als Farbcodierungsnorm wird das PAL-System verwendet. Die Wahl von PAL ist insbesondere durch dessen Eigenschaften im Hinblick auf Störunterdrückung begründet. Durch die zeilenweise Phaseninvertierung der Farbinformation werden Farbfehler teilweise kompensiert, was im Kontext einer analogen Funkübertragung zu einer robusteren Bilddarstellung beiträgt. Dies unterstützt die Qualitätsanforderung NFA-04 hinsichtlich einer möglichst störarmen Darstellung (siehe Kapitel 2.1.2).

5.4.2 Sende- und Empfangseinheit

Die Sendeeinheit übernimmt die Modulation des Videosignals auf einen hochfrequenten Träger, während die Empfangseinheit die entsprechende Demodulation durchführt. Zur Erfüllung der Anforderungen NFA-05 und NFA-06 werden marktverfügbare analoge Videosender- und Empfängermodule eingesetzt. Diese zeichnen sich durch eine hohe Integration, geringe Latenz und einfache Handhabung aus. Die analoge Übertragung vermeidet

zusätzliche Kodierungs- und Dekodierungsprozesse und erfüllt damit die Anforderung einer quasi-echtzeitfähigen Übertragung (NFA-01).

5.4.3 Funkübertragungstrecke

Die Funkübertragung erfolgt über ein ISM-Frequenzband unter Einhaltung regulatorischer Vorgaben (SA-02). Die Ausbreitung des Signals wird durch physikalische Effekte wie FSPL, Reflexionen und Abschattungen beeinflusst. Diese Effekte wirken sich direkt auf die Reichweite und Stabilität der Übertragung aus und stehen im Zusammenhang mit den Anforderungen NFA-02 und NFA-03 (siehe Kapitel 2.2).

5.4.4 Video-Digitalisierungseinheit

Die Digitalisierungseinheit dient der Umsetzung der funktionalen Anforderung FA-04. Hierbei wird das analoge Videosignal in ein digitales Format überführt.

5.4.5 Schnittstelle zum Rechner

Die Schnittstelle zum Rechner wird über USB realisiert. Durch die Nutzung der UVC wird sichergestellt, dass das System als standardkonformes Videogerät erkannt wird (FA-06, NFA-09). Dies ermöglicht eine direkte Nutzung des Systems ohne zusätzliche Treiberinstallation und erfüllt somit die Anforderungen an Benutzerfreundlichkeit und Kompatibilität (siehe Kapitel 2.5.2 und 2.5.3).

5.5 Annahmen für fehlende Systemparameter

5.5.1 ISM-Frequenzband

Die Auswahl des Frequenzbereichs für die drahtlose Übertragung stellt eine zentrale Entwurfsentscheidung dar, da sie maßgeblich die Reichweite beeinflusst. Gemäß der Systemanforderung SA-02 darf die Übertragung ausschließlich in zulässigen Frequenzbereichen erfolgen. Laut dem Frequenzplan der BNetzA stehen für Anwendungen ohne individuelle Frequenzzuteilung stehen die sogenannten ISM-Bänder zur Verfügung. Diese sind für eine Vielzahl von Funkanwendungen freigegeben, unterliegen jedoch Einschränkungen hinsichtlich maximaler Sendeleistung und Nutzungsbedingungen (siehe Kapitel 2.2.4).

Die zu entwerfende Anwendung zählt laut Frequenzplan zu der Nutzungskategorie 10. Dies sind Funkanwendungen geringer Reichweite, wobei die Bedingung der Nutzung zur

Übertragung von Bilddaten genannt sein muss. Somit ergeben sich die folgenden nutzbaren Frequenzbereiche in Tabelle 7 [18].

Frequenz f in [GHz]
2,4000 - 2,4835
5,7250 - 5,8750
24,0000 - 24,2500
57,0000 - 64,0000
122,0000 - 123,0000
244,0000 - 246,0000

Tabelle 7 ISM-Bänder laut Frequenzplan der BNetzA für Bildsignalübertragung nach [18]

In der folgenden Betrachtung und Festlegung des zu verwendenden Frequenzbereiches werden alle ISM-Bänder außer den Frequenzbereichen von 2,4 GHz sowie 5,8 GHz für den vorliegenden Systementwurf ausgeschlossen. Diese Entscheidung beruht auf den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Ausbreitungsmechanismen und der damit verbundenen FSPL. Durch höhere Frequenz steigt die FSPL deutlich an, wodurch sich die erzielbare Reichweite bei gleicher Sendeleistung erheblich reduziert. Dies lässt sich mit Formel (6) nachweisen. Werden für die Entfernung $d = 50 \text{ m}$ angenommen, so erhält man für die verschiedenen Frequenzbereiche die in Tabelle 8 angegebenen Werte der FSPL.

Frequenz f in [GHz]	Freiraumdämpfung L_F in [dB]
2,4000 - 2,4835	74,03 – 74,33
5,7250 - 5,8750	81,59 – 81,81
24,0000 - 24,2500	94,03 – 94,12
57,0000 - 64,0000	101,55 – 102,55
122,0000 - 123,0000	108,15 – 108,23
244,0000 - 246,0000	114,18 – 114,24

Tabelle 8 Freiraumdämpfung bei den ISM-Bänder für Bildsignalübertragung bei einer Entfernung von 50 m

Des Weiteren sind für die höheren Frequenzbereiche keine Komponenten am Markt verfügbar. Somit steht die Verfügbarkeit solcher Systeme im Widerspruch zur Systemanforderung SA-05. Aus diesen Gründen wird die weitere Betrachtung auf die ISM-Bänder bei 2,4 GHz und 5,8 GHz beschränkt. Diese beiden Frequenzbereiche werden auch von einer Vielzahl kommerzieller Systeme genutzt, insbesondere im Bereich WLAN, Bluetooth sowie bei analogen Videoübertragungssystemen im Modellbau [18]. Für eine differenzierte Entscheidungsfindung des geeigneten Frequenzbereichs für den Referenzaufbau ist in Tabelle 9 ein Vergleich nach ausgewählten Kriterien dargestellt.

Kriterium	2,4 -GHz-Bereich	5,8-GHz-Bereich
Frequenzbereich	2,4000 - 2,4835 GHz	5,7250 - 5,8750 GHz
Freiraumdämpfung L_F	Ca. 74 dB	Ca. 82 dB
Reichweite	$d_{2,4 \text{ GHz}} \approx 2,4 \cdot d_{5,8 \text{ GHz}}$	
Maximale EIRP	10 mW bzw. 10 dBm	25 mW bzw. 13,979 dBm
Hindernisdurchdringung	Gut	eingeschränkt
Störanfälligkeit	Hoch [52]	Gering [52]
Anwendungen	WLAN, Bluetooth, Funkfernsteuerungen [53]	WLAN, Videoübertragung [52]

Tabelle 9 Vergleich zwischen dem 2,4-GHz- und dem 5,8-GHz-Bereich

Das 2,4-GHz-Band zeichnet sich durch günstige Ausbreitungsbedingungen aus. Aufgrund der geringeren Frequenz ist die FSPL niedriger (siehe Tabelle 8), und elektromagnetische Wellen weisen eine bessere Durchdringung von Hindernissen wie Wänden oder Vegetation auf. Dies führt in der Regel zu größeren erreichbaren Reichweiten, insbesondere in Innenräumen. Demgegenüber steht jedoch eine sehr hohe Auslastung dieses Frequenzbandes. Neben vielen WLAN-Systemen arbeiten auch Bluetooth-Geräte, Funk-Tastaturen sowie zahlreiche weitere Funksysteme in diesem Bereich. Dies führt zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Interferenzen und kann die Stabilität der Übertragung erheblich beeinträchtigen [52, 53].

Das 5,8-GHz-Band weist hingegen ungünstigere Ausbreitungsbedingungen auf. Die höhere Frequenz führt zu einer stärkeren FSPL (siehe Tabelle 8) sowie einer geringeren Durchdringungsfähigkeit von Hindernissen, was sich negativ auf die Reichweite auswirken kann.

Demgegenüber bietet dieses Frequenzband jedoch entscheidende Vorteile hinsichtlich der Störsituation. Die Belegung ist im Vergleich zum 2,4-GHz-Band deutlich geringer, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Interferenzen reduziert wird [53].

Die Auswahl des Frequenzbandes erfolgt unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.5.2 definierten Anforderungen. Insbesondere sind hierbei die Anforderungen an eine stabile Übertragung (NFA-03) sowie eine möglichst störarme Signalübertragung (NFA-04) maßgeblich. Obwohl das 2,4-GHz-Band potenziell größere Reichweiten ermöglicht, stellt die hohe Störbelastung ein erhebliches Risiko für die Übertragungsstabilität dar. Dies steht im Widerspruch zur Anforderung einer zuverlässigen und kontinuierlichen Videoübertragung. Das 5,8-GHz-Band bietet hingegen eine geringere Störanfälligkeit und bessere Voraussetzungen für eine stabile Übertragung. Die geringere Reichweite kann im Rahmen der Systemauslegung durch die höhere EIRP voraussichtlich kompensiert werden. Unter Abwägung der genannten Aspekte wird für das vorliegende System das 5,8-GHz-ISM-Band als bevorzugter Frequenzbereich gewählt. Diese Entscheidung basiert auf folgenden Kriterien:

- Einhaltung regulatorischer Vorgaben gemäß Frequenzplan der Bundesnetzagentur (SA-02) [18]
- geringere Störbelastung und damit höhere Übertragungsstabilität (NFA-03) [52, 53]
- hohe Verfügbarkeit geeigneter Komponenten (NFA-05) [50, 51]

Damit stellt das 5,8-GHz-Band eine geeignete Grundlage für die Realisierung des Systems dar und erfüllt die Anforderungen sowohl aus technischer als auch aus regulatorischer Sicht.

5.5.2 Erforderliche Übertragungreichweite

Die in der Anforderungsanalyse formulierte Mindestreichweite (NFA-02) ist nicht explizit quantifiziert und wird daher im Rahmen des Systementwurfs konkretisiert. Zur Bewertung geeigneter Reichweiten wird zunächst ein Vergleich mit etablierten drahtlosen Kommunikationssystemen herangezogen. Insbesondere WLAN-Systeme nach IEEE 802.11, die ebenfalls im lizenzfreien ISM-Frequenzspektrum bei 2,4 GHz sowie 5,8 GHz betrieben werden, stellen eine geeignete Referenz dar. In Anwendungsfall erreichen diese Systeme typischerweise folgende Reichweiten [54]:

- Innenbereich: ca. 20 m
- Außenbereich (LOS): ca. 100 m

Im Kontext der vorliegenden Aufgabenstellung wird die Reichweite von WLAN-Systemen jedoch als unzureichend bewertet. Insbesondere für Anwendungen, bei denen eine stabile Videoübertragung über größere Distanzen erforderlich ist, stellen die begrenzten Reichweiten eine Einschränkung dar. Aus diesem Grund wird für das zu entwickelnde System eine gegenüber WLAN erhöhte Mindestreichweite gefordert. Unter Berücksichtigung der physikalischen Randbedingungen der Funkübertragung im ISM-Band sowie der Zielsetzung eines robusten Referenzaufbaus werden folgende Mindestwerte festgelegt:

- Mindestreichweite Innenbereich: 40 m
- Mindestreichweite Außenbereich (LOS): 200 m

Diese Werte liegen signifikant oberhalb typischer WLAN-Reichweiten und tragen der Zielstellung Rechnung, eine zuverlässige Videoübertragung auch über doppelt so hohe Distanzen zu ermöglichen. Die festgelegten Mindestreichweiten stellen somit eine konkretisierte Systemanforderung dar und dienen als Grundlage für die spätere Verifikation im Rahmen von Reichweiten- und Funktionstests.

5.6 Festlegung der Systemparameter

Auf Basis der in Kapitel 4 definierten Anforderungen sowie der im vorliegenden Kapitel 5.5 hergeleiteten Systemarchitektur werden im Folgenden die zentralen Systemparameter festgelegt. Diese konkretisieren die Systemauslegung und bilden die Grundlage für den anschließenden Detailentwurf sowie die spätere Verifikation im Sinne des V-Modells.

Ein wesentlicher Systemparameter ist das zu verarbeitende Videosignal. Entsprechend der funktionalen Anforderung FA-01 sowie der Systemanforderung SA-01 wird ein analoges Videosignal im CVBS-Format verwendet. Als Farbcodierungsnorm wird das PAL-System festgelegt, da dieses aufgrund seiner phasenkorrigierenden Eigenschaften eine erhöhte Robustheit gegenüber Übertragungsstörungen aufweist und somit die Qualitätsanforderung NFA-04 unterstützt.

Für die drahtlose Übertragung wird gemäß der Systemanforderung SA-02 ein zulässiger Frequenzbereich aus dem ISM-Spektrum gewählt. Auf Grundlage der Analyse des Frequenzplans der BNetzA sowie des Vergleichs der ISM-Bänder wird das 5,8-GHz-Band als bevorzugter Frequenzbereich festgelegt. Diese Entscheidung basiert insbesondere auf der

geringeren Störanfälligkeit im Vergleich zum stark ausgelasteten 2,4-GHz-Band sowie der guten Verfügbarkeit geeigneter Komponenten (NFA-05).

Ein weiterer zentraler Systemparameter ist die geforderte Übertragungreichweite. Auf Basis eines Vergleichs mit WLAN-Systemen, wird für das vorliegende System eine erhöhte Mindestreichweite von 200 m im Außenbereich bei LOS, sowie 40 m im Innbereich festgelegt. Diese Werte erfüllen die Zielsetzung, eine gegenüber WLAN verbesserte Reichweite zu erzielen, und tragen somit der Anforderung NFA-03 Rechnung.

Die Schnittstelle zum Rechner wird über USB realisiert. Zur Erfüllung der Anforderungen FA-06 und NFA-09 wird das System als UVC-kompatibles Videogerät ausgelegt, wodurch eine standardisierte Erkennung und Nutzung ohne zusätzliche Treiber ermöglicht wird.

Hinsichtlich der technischen Umsetzung wird festgelegt, dass ausschließlich marktverfügbare und dokumentierte Komponenten eingesetzt werden (NFA-05). Dies betrifft insbesondere die Videoübertragungsmodule sowie die Digitalisierungseinheit und gewährleistet die Realisierbarkeit des Systems als Laboraufbau (NFA-06).

Zusammenfassend ergeben sich die in Tabelle 10 dargestellten Systemparameter.

Parameter	Festlegung
Videosignal	CVBS mit PAL-Farbkodierung
Frequenzbereich	5,8 GHz ISM-Band
Mindestreichweite Innenbereich	40 m
Mindestreichweite Außenbereich	200 m
Schnittstelle zum PC	USB
Störanfälligkeit	Marktverfügbar
Systemaufbau	Modularer Laboraufbau

Tabelle 10 Systemparameter gemäß dem Systementwurf

Die festgelegten Systemparameter stellen eine konkrete Ausprägung der zuvor definierten Anforderungen dar und bilden neben den Anforderungen aus Kapitel 4 die Grundlage für den nachfolgenden Detailentwurf sowie die Verifikation des Systems.

6 Detailentwurf

In diesem Kapitel erfolgt die Konkretisierung der im Systementwurf abgeleiteten Systemarchitektur durch die Auswahl geeigneter marktverfügbarer Komponenten sowie deren funktionale und elektrische Integration in ein Gesamtsystem. Ziel des Detailentwurfs ist die Überführung der abstrakten Systemstruktur in eine technisch realisierbare Ausführung, welche die in der Anforderungsanalyse definierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen erfüllt. Hierzu werden die im Systementwurf identifizierten Teilsysteme durch konkrete Hardwarekomponenten umgesetzt. Zudem werden die Schnittstellen zwischen den Teilsystemen sowie Anforderungen an Spannungsversorgung und Signalführung definiert.

6.1 Kameraeinheit

Die Kameraeinheit übernimmt die Erfassung der Bildinformation und stellt das Ausgangssignal der Übertragungskette bereit. Zur Realisierung dieser Funktion wird die analoge FPV-Kamera T-Rex Micro der Marke Foxeer eingesetzt. Die für die Integration relevanten Herstellerangaben sind in Tabelle 11 dargestellt.

Merkmal	Herstellerangabe
Video-Ausgang	CVBS
Farbkodierung	PAL/NTSC umschaltbar
Seitenverhältnis	4:3 oder 16:9 umschaltbar
Versorgungsspannung	4,5 – 16 V
Stromaufnahme	270 mA bei 5 V (15% Toleranz)
Abmessungen (BxHxL)	19 x 19 x 24,2 mm
Gewicht	8,6 g (ohne Kabel)
Schnittstelle Ausgang	2 Adern (Video und GND)

Tabelle 11 Spezifikationen der Foxeer T-Rex Micro nach [55]

Im Vergleich zu anderen FPV-Kameras zeichnet sie sich durch eine sehr gute Bildqualität aus. Dies ist damit zu begründen, dass diese Kamera in einer höheren Auflösung aufnimmt

und anschließend auf die Qualität von CVBS herunter skaliert. Dies dient der Anforderung NFA-04. Des Weiteren ist sie gemäß Anforderung NFA-08 in ihrer physischen Abmessung minimal gehalten. Sie gibt ein CVBS in einem Seitenverhältnis von 4:3 oder 16:9 aus, wodurch die Anforderungen SA-01 erfüllt wird. Die Spannungsversorgung der Kamera erfolgt mit einer Gleichspannung von 5 V. Diese entspricht der Anforderung NFA-07. Ein weiterer Vorteil gegenüber anderen Kameras ist, dass die notwendige Zusatzhardware zur Konfiguration der Kamera direkt im Lieferumfang enthalten ist [55, 56].

6.2 Sendeeinheit

Die Sendeeinheit dient der Umsetzung der drahtlosen Übertragung des Videosignals durch Modulation des analogen Eingangssignals auf einen hochfrequenten Träger. Zur Realisierung dieser Funktion wird der VTX Unify Pro32 Nano der Marke TBS eingesetzt. Die für die Integration relevanten Herstellerangaben sind in Tabelle 12 dargestellt.

Merkmal	Herstellerangabe
Video-Eingang	CVBS
Farbkodierung	PAL/NTSC
Seitenverhältnis	4:3 oder 16:9 umschaltbar
Versorgungsspannung	5 – 13 V
Stromaufnahme	210 mA bei 25 mW Sendeleistung
Sendefrequenz	5,8-GHz ISM-Bänder
Abmessungen (BxHxL)	13 x 3 x 14,5mm
Gewicht	1 g (ohne Kabel)
Schnittstelle Eingang	2 Adern (Video und GND)
Schnittstelle Ausgang	u.FL

Tabelle 12 Spezifikationen des TBS Unify Pro32 Nano nach [57, 58]

Im Vergleich zu anderen VTX wird bei dem TBS Unify Pro32 Nano die geforderte Spannungsversorgung von 5 V gewährleistet. Bei anderen VTX wird häufig mit höheren Spannungen gearbeitet, um höhere Sendeleistungen zu erzielen, da in vielen anderen Ländern

keine Begrenzung der EIRP existiert bzw. diese häufig missachtet wird. Für die in Deutschland maximal zulässige EIRP von 25 mW reicht die Spannung von 5 V jedoch vollkommen aus. So kann der VTX gemeinsam mit der Kamera aus einer einheitlichen Versorgung betrieben werden. Dies reduziert die Komplexität des Aufbaus und unterstützt die Umsetzung eines kompakten und übersichtlichen Aufbaus. Das Modul ist für die Übertragung analoger Videosignale im 5,8-GHz-ISM-Band ausgelegt und erfüllt somit den gewählten Systementwurf nach Kapitel 5.6. Die physischen Abmessungen sind gemäß Anforderung NFA-08 [18, 57].

6.3 Antennen

Die Funkübertragungsstrecke bildet die drahtlose Verbindung zwischen Sende- und Empfangseinheit und basiert auf der Übertragung im lizenzfreien 5,8-GHz-ISM-Band. Für die Umsetzung der elektromagnetischen Kopplung werden die Antennen Triumph Pro der Marke TBS eingesetzt. Die für die Integration relevanten Herstellerangaben sind in Tabelle 13 dargestellt.

Merkmal	Herstellerangabe
Polarisation	RHCP
Gewinn der Antenne	1,6 dBi
Frequenzbereich	5,5 -6,0 GHz
Abmessungen (BxHxL)	k.A. x k.A. x 130 mm
Gewicht	6,6 g
Schnittstelle Eingang	SMA (50 Ohm)

Tabelle 13 Spezifikation der TBS Triumph Pro nach [59]

Diese Antenne ist aufgrund ihrer zirkularen Polarisation gegenüber Antennen mit Linearer Polarisation besonders gut geeignet. Im Vergleich zu linear polarisierten Antennen ist sie unempfindlicher gegenüber Lageänderungen von Sender und Empfänger und reduziert Einflüsse durch Reflexionen und Mehrwegeausbreitung (siehe Kapitel 2.2.3). Dadurch wird eine stabilere und störärmere Übertragung erreicht, was sie für den vorgesehenen Aufbau zu einer geeigneten Wahl macht. Außerdem ist sie aufgrund ihrer größeren Länge

gegenüber anderen Antennen in dem Vorteil, von einer erhöhten Position abstrahlen zu können, wodurch die Reichweite theoretisch erhöht werden kann.

6.3.1 Verbindung zur Sendeeinheit

Zur Anbindung der Antenne an die Sendeeinheit ist eine Anpassung zwischen den unterschiedlichen Steckverbindungstypen erforderlich. Der eingesetzte VTX verfügt über einen U.FL-Anschluss, während die verwendete Antenne über einen SMA-Steckverbinder angebunden wird. Zur Realisierung der Verbindung wird ein Koaxialkabel mit U.FL- auf SMA-Anschluss des Herstellers Taoglas Limited eingesetzt. Dabei handelt es sich um das Model CAB.01036. Die für die Integration relevanten Herstellerangaben sind in Tabelle 13 dargestellt.

Merkmale	Herstellerangabe
Schnittstelle Eingang	U.FL Female (50 Ohm)
Schnittstelle Ausgang	SMA Female (50 Ohm)
Frequenzbereich	0,0 - 6,0 GHz
Dämpfung	5,05 (bei 5 GHz) und 5,40 (bei 6 GHz) dB pro m
Abmessungen (BxHxL)	k.A. x k.A. x 300 mm
Gewicht	k.A.

Tabelle 14 Spezifikationen des CAB.01036 [60, 61]

Das zu verwendende Koaxialkabel weist eine Länge von 300 mm auf. Die Wahl dieser Kabellänge erfolgt nicht ausschließlich aus mechanischen Gesichtspunkten, sondern berücksichtigt gezielt die Einhaltung der regulatorischer Vorgaben hinsichtlich der EIRP von 25 mW bzw. 14 dBm im 5,8-GHz-ISM-Band (siehe Kapitel 2.2.4 und 5.5.1). Bei niedrigen Frequenzen ist die Dämpfung am geringsten. Im 5,8 GHz-Bereich wäre das eine Frequenz von ca. 5,7 GHz. Nach einer linearen Approximation gemäß der Formel (11) hat das Koaxialkabel eine Dämpfung $G_{5,7 \text{ GHz}}$ von rund 5,3 dB pro m.

$$G_{5,7 \text{ GHz}} = \frac{G_{6 \text{ GHz}} - G_{5 \text{ GHz}}}{f_{\Delta}} \cdot 0,7 \text{ GHz} + G_{5 \text{ GHz}} \quad (11)$$

$$G_{5,7 \text{ GHz}} = \frac{5,4 \frac{\text{dB}}{\text{m}} - 5,05 \frac{\text{dB}}{\text{m}}}{1 \text{ GHz}} \cdot 0,7 \text{ GHz} + 5,05 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$$

$$G_{5,7 \text{ GHz}} = 5,295 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$$

Durch die Kabellänge l_K von 300 mm ergibt sich eine frequenzabhängige Dämpfung des HF-Signals von etwa 1,6 dB, gemäß Formel (12).

$$L_K = \frac{G_{5,7 \text{ GHz}}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}} \cdot l_K \quad (12)$$

$$L_K = \frac{5,295 \frac{\text{dB}}{\text{m}}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}} \cdot 300 \text{ mm}$$

$$L_K = 1,589 \text{ dB}$$

Diese Dämpfung kompensiert die Antennenverstärkung von etwa 1,6 dBi, sodass sich gemäß der Formel (10) aus Kapitel 2.2.4 insgesamt eine EIRP von 13,99 dBm ergibt.

$$EIRP = 13,979 \text{ dBm} - 1,589 \text{ dB} + 1,6 \text{ dBi}$$

$$EIRP = 13,99 \text{ dBm}$$

Dadurch wird theoretisch der Maximalwert für die EIRP um 0,01 dBm überschritten, dennoch kann in der realisierten Umsetzung aufgrund der Einfügedämpfung der Steckverbindungen auf der Leiterplatte der Sendeeinheit sowie an denen des Koaxialkabels davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche EIRP unterhalb des Grenzwertes liegt [62].

Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz eines Koaxialkabels eine flexible räumliche Trennung zwischen Sendeeinheit und Antenne. Dies erlaubt eine gezielte Positionierung der Antenne unabhängig von der Elektronik, wodurch eine verbesserte Empfangs- und Sendecharakteristik erreicht werden könnten. Die gewählte Kombination aus Sendeeinheit, Kabel und Antenne stellt somit eine technisch und regulatorisch geeignete Lösung für den Referenzaufbau dar.

6.4 Empfangseinheit

Die Empfangseinheit übernimmt die Detektion und Demodulation des übertragenen HF-Signals sowie die Rekonstruktion des analogen Videosignals. Zur Realisierung dieser Funktion wird der RC832 Mini-Empfänger eingesetzt. Die für die Integration relevanten Herstellerangaben sind in Tabelle 15 dargestellt.

Merkmale	Herstellerangabe
Versorgungsspannung	12 V
Stromaufnahme	130 mA
Frequenzbereich	5,8-GHz ISM-Bänder
Empfindlichkeit	- 95 dB
Abmessungen (BxHxL)	50 x 15 x50 mm
Gewicht	42,5 g
Schnittstelle Eingang	RP-SMA (50 Ohm)
Schnittstelle Ausgang	3,5 mm Klinke

Tabelle 15 Spezifikationen des RC832 Mini nach [63–65]

Das VRX ist für den Empfang analoger Videosignale im 5,8-GHz-Bereich konzipiert und stellt am Ausgang ein demoduliertes CVBS bereit. Damit wird die im Systementwurf definierte Funktion der Empfangseinheit vollständig umgesetzt. Der Wert der Empfindlichkeit ist eine Annahme, da im Handbuch nur auf eine 5 dB niedrigere Empfindlichkeit gegenüber anderen Herstellern verwiesen wird. Auf dem Markt gibt es zum Zeitpunkt der Recherche kein anderes vergleichbares Produkt, welches noch verfügbar ist. Somit war ein Vergleich mit anderen Produkten nicht möglich. Für die Empfindlichkeit konnte jedoch ein älteres Produktdatenblatt zum Vergleich herangezogen werden [63–65].

6.5 Video-Digitalisierungseinheit

Die Digitalisierungseinheit dient der Umsetzung der Anforderung, das empfangene analoge Videosignal in ein digitales Format zu überführen und für die Weiterverarbeitung auf einem Rechner bereitzustellen. Im Rahmen des Detailentwurfs werden zwei alternative Realisierungsvarianten betrachtet, welche sich hinsichtlich Komplexität, Flexibilität und Integrationsaufwand unterscheiden.

6.5.1 Variante A: Digitalisierung mittels USB-Videokonverter

In der ersten Realisierungsvariante erfolgt die Digitalisierung des analogen Videosignals durch einen Videokonverter. Dabei wird auf den DFG/USB2pro der Firma The Imaging Source gesetzt. Die für die Integration relevanten Herstellerangaben sind in Tabelle 16 dargestellt.

Merkmal	Herstellerangabe
Video-Eingang	CVBS
Farbkodierung	PAL/NTSC
Seitenverhältnis	4:3
Versorgungsspannung	5 V
Stromaufnahme	200 mA
Video-Ausgang	YCbCr (UYVY) in 4:2:2
Abmessungen (BxHxL)	56 x 27 x 95,8 mm
Gewicht	100 g
Schnittstelle Eingang	Cinch
Schnittstelle Ausgang	USB 2.0 Typ B

Tabelle 16 Spezifikationen des DFG/USB2pro nach [66]

Das vom VRX bereitgestellte CVBS-Signal wird direkt dem Eingang des Konverters zugeführt. Dieser übernimmt die interne Signalaufbereitung sowie die Analog-Digital-Wandlung und stellt das resultierende Videosignal über eine USB 2.0 Schnittstelle zur Verfügung. Durch die Integration von Digitalisierung und Schnittstellenfunktionalität in einem Gerät wird

die Systemkomplexität reduziert. Gleichzeitig wird eine standardkonforme Anbindung an einen Rechner ermöglicht, wodurch das System als Videogerät erkannt. Zur Anwendung wird allerdings ein zusätzliche Treiber benötigt. Damit werden die im Systementwurf definierte Funktionen der Digitalisierungseinheit sowie der Schnittstelle zum PC vollständig umgesetzt. Auf dem Markt gibt es zum Zeitpunkt der Recherche kein anderes vergleichbares Produkt, wodurch ein Vergleich mit anderen Produkten nicht möglich ist. Diese Variante zeichnet sich durch eine hohe Integrationsdichte, geringe Implementierungskomplexität und eine robuste Funktionalität aus [66].

6.5.2 Variante B: Digitalisierung mittels Video-Decoder und Einplatinencomputer

In der zweiten Realisierungsvariante erfolgt die Digitalisierung des Videosignals unter Verwendung des Evaluationsboards EVAL-ADV7282AMEBZ von Analog Devices mit dem Video-Decoder-IC ADV7282AWBCPZ-M in Kombination mit dem Einplatinencomputer Raspberry Pi Zero 2 W. Die für die Integration relevanten Herstellerangaben sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 dargestellt.

Merkmal	Herstellerangabe
Video-Eingang	CVBS
Farbkodierung	PAL/NTSC
Seitenverhältnis	4:3
Versorgungsspannung	7,5 V
Video-Ausgang	8 Bit YCbCr (UYVY) in 4:2:2
Abmessungen (BxHxL)	k.A. x k.A. x k.A. mm
Gewicht	490,48 g
Schnittstelle Eingang	Cinch
Schnittstelle Ausgang	MIPI CSI 2 D-Phy (Koaxial)

Tabelle 17 Spezifikationen des EVAL-ADV7282AMEBZ nach [67–70]

Merkmale	Herstellerangabe
Video-Eingang	8 Bit YCbCr in 4:2:2
Versorgungsspannung	5 V
Abmessungen (BxHxL)	65 x k.A. x 30 mm
Gewicht	k.A.
Schnittstelle Eingang	MIPI CSI 2 D-Phy (Flachbandkabel)
Schnittstelle Ausgang	USB 2.0 Micro Typ B (OTG)

Tabelle 18 Spezifikationen des Raspberry Pi Zero 2 W nach [71]

Das analoge Videosignal wird dem Video-Decoder ADV7282A-M zugeführt, welcher eine Wandlung in das digitale Format YCbCr 4:2:2 vornimmt (siehe Kapitel 2.3.4). Die resultierenden digitalen Daten werden anschließend über die MIPI CSI-2 Anbindung an den Raspberry Pi weitergeleitet. Dieser verarbeitet den Datenstrom für die Ausgabe an einen Rechner weiter, welcher anschließend über die USB-Schnittstelle bereitgestellt wird. Dies ist ausschließlich möglich, da das Betriebssystem von den Raspberry Pi den ADV7282A-M als Brücken-IC akzeptiert und als „Kamera“ erkennt [67, 68, 71, 72]. Diese Architektur ermöglicht eine flexible Verarbeitung des Videosignals sowie die Integration zusätzlicher Funktionen, beispielsweise im Bereich der Signalaufbereitung oder Bildverarbeitung. Da es sich bei dem Raspberry Pi Zero 2 W um einen Rechner handelt, welcher in seiner physischen Abmessung klein ist, wäre somit auch eine mobil Lösung für die Empfängerseite realisierbar. Demgegenüber stehen jedoch ein erhöhter Implementierungsaufwand sowie eine komplexere Systemintegration.

6.6 Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung des Gesamtsystems stellt eine zentrale Voraussetzung für den Betrieb aller Komponenten dar und wird getrennt für die Sender- und Empfängerseite betrachtet, da unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Spannungsniveau und Systemintegration bestehen.

Auf der Senderseite ist gemäß Anforderungskatalog eine Versorgungsspannung von 5 V vorgesehen. Diese wird im Referenzaufbau durch eine Powerbank mit USB-Anschluss realisiert, über die sowohl die Kamera als auch die Sendeeinheit versorgt werden. Dies

ermöglicht eine einfache, standardisierte Spannungsversorgung sowie einen mobilen Betrieb der Sendeseite.

Auf der Empfängerseite ergeben sich unterschiedliche Anforderungen. Der eingesetzte VRX RC832 Mini benötigt 12 V, während die Digitalisierungseinheit je nach Variante unterschiedliche Spannungen erfordert. Der Videokonverter DFG/USB2pro wird direkt über die USB-Schnittstelle des Rechners versorgt, während das Evaluationsboard EVAL-ADV7282AMEBZ eine Versorgungsspannung von 7,5 V über ein externes Netzteil erhält. Der Raspberry Pi Zero 2 W wird ebenfalls über USB mit 5 V betrieben.

Zur Versorgung des VRX wird ein Spannungswandler (XL6019) eingesetzt, der eine Eingangsspannung von 5 V auf die benötigten 12 V anhebt. Die relevanten Herstellerangaben sind in Tabelle 19 dargestellt.

Merkmal	Herstellerangabe
Eingangsspannung	5 - 35 V
Ausgangsspannung	5 - 40 V
Ausgangsstrom	1,5 A
Ausgangsleistung	20 W
Abmessungen (BxHxL)	21 x 13 x 46 mm
Gewicht	k.A.
Schnittstelle Eingang	2 Adern (Spannung und GND)
Schnittstelle Ausgang	2 Adern (Spannung und GND)

Tabelle 19 Spezifikationen des XL6019 nach [73, 74]

Die gewählte Lösung bietet mehrere Vorteile. Durch die Verwendung einer Eingangsspannung von 5 V kann auch der Empfänger über eine standardisierte USB-Spannungsquelle betrieben werden, was die Handhabung und Integration vereinfacht. Darüber hinaus wird durch die modulare Auslegung der Spannungsversorgung eine gute Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit des Systems erreicht [73, 74].

Insgesamt stellt die gewählte Spannungsversorgung eine technisch einfache, flexible und praxisgerechte Lösung dar, die den Anforderungen an einen mobilen und reproduzierbaren Referenzaufbau gerecht wird.

6.7 Reichweitenabschätzung der Funkstrecke

Im Rahmen des Detailentwurfs erfolgt eine theoretische Abschätzung der erreichbaren Übertragungsreichweite der Funkstrecke auf Basis der zuvor im theoretischen Hintergrund hergeleiteten Formel (9) (siehe Kapitel 2.2.2). Ziel dieser Betrachtung ist die Überprüfung, ob die gewählte Kombination aus Sende- und Empfangskomponenten grundsätzlich geeignet ist, die im Systementwurf definierte Mindestreichweite von 200 m bei LOS zu erreichen.

Für die Berechnung werden die nun konkret ausgewählten Komponentenparameter herangezogen. Hierzu zählen insbesondere die Sendeleistung des Videosenders L_S , die Empfindlichkeit des Empfängers L_E , die Antennengewinne G_S und G_E . Die Dämpfung des eingesetzten Koaxialkabels L_K muss an dieser Stelle ergänzt werden, da diese in der Formel (9) noch nicht berücksichtigt wurde. Durch Einsetzen der Dämpfung L_K in die Formel (9) ergibt sich Formel (13).

$$d = 10^{\left(\frac{L_S - L_K + G_S + G_E - L_E}{20} - \lg\left(\frac{4\pi}{c} \cdot f\right)\right)}, \text{ mit } L_S - L_K + G_S = \text{EIRP}$$

$$d = 10^{\left(\frac{\text{EIRP} + G_E - L_E}{20} - \lg\left(\frac{4\pi}{c} \cdot f\right)\right)} \quad (13)$$

Für die Lichtgeschwindigkeit c wurde die Konstante für die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Luft angenommen.

$$d = 10^{\left(\frac{13,99 \text{ dBm} + 1,6 \text{ dBi} - (-95 \text{ dB})}{20} - \lg\left(\frac{4\pi}{2,99711 \cdot 10^9 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot 5,8 \cdot 10^9 \text{ Hz}\right)\right)}$$

$$d = 1391,76 \text{ m}$$

Unter Verwendung der konkreten Systemparameter ergibt sich eine theoretische Reichweite von etwa 1,4 km. Damit wird die im Systementwurf definierte Mindestreichweite deutlich überschritten, sodass die gewählte Systemauslegung aus theoretischer Sicht als geeignet bewertet werden kann. Die Berechnung basiert auf idealisierten Annahmen, insbesondere einer FSPL ohne zusätzliche Dämpfung durch Hindernisse, Mehrwegeausbreitung oder Störeinflüsse. In der praktischen Anwendung ist daher mit einer geringeren tatsächlich erreichbaren Reichweite zu rechnen. Die ermittelte theoretische Reichweite dient somit als Referenzwert für die Auslegung des Systems. Eine experimentelle Überprüfung sowie ein Vergleich mit den tatsächlich erzielten Reichweiten erfolgen im Rahmen der Verifikation (siehe Kapitel 8.5.1).

6.8 Ergänzende Komponenten zur Systemintegration

Für die Realisierung eines funktionsfähigen Gesamtsystems sind neben den im Detailentwurf beschriebenen Hauptkomponenten zusätzliche Bauelemente erforderlich, die die elektrische und mechanische Verbindung der einzelnen Baugruppen ermöglichen. Hierzu zählen insbesondere Leitungen zur Signal- und Spannungsübertragung, Flachbandkabel sowie verschiedene Steckverbinder. Diese Komponenten sind für die praktische Umsetzung von Bedeutung, da sie eine korrekte Signalführung, stabile Spannungsversorgung sowie die mechanische Integrität des Aufbaus sicherstellen. Eine detaillierte Betrachtung erfolgt im Detailentwurf jedoch nicht, da sie keinen direkten Einfluss auf die grundlegende Systemarchitektur haben. Eine vollständige Auflistung aller verwendeten Komponenten ist in Anhang 1 enthalten. Ergänzend sind in Anhang 2 die zugehörigen Datenblätter, Anleitungen sowie Herstellerquellen aufgeführt, insofern diese verfügbar sind.

6.9 Schaltungsentwurf

Auf Grundlage der im Detailentwurf ausgewählten Komponenten sowie der definierten Schnittstellen erfolgt in diesem Kapitel die Ausarbeitung des Schaltungsentwurfs des Gesamtsystems. Ziel ist die Darstellung der elektrischen Verschaltung der einzelnen Baugruppen unter Berücksichtigung der Signalführung, der Spannungsversorgung sowie der funktionalen Zusammenhänge.

Der Schaltungsentwurf wird dabei in mehrere Teilbereiche gegliedert, um die Systemstruktur übersichtlich und nachvollziehbar abzubilden. Aufgrund der klaren Trennung zwischen Sender- und Empfängerseite sowie der Existenz zweier Realisierungsvarianten für die Digitalisierungseinheit werden insgesamt drei Schaltpläne dargestellt:

- Schaltplan der Senderseite
- Schaltplan der Empfängerseite mit Variante A
- Schaltplan der Empfängerseite mit Variante B

6.9.1 Schaltungsentwurf der Senderseite

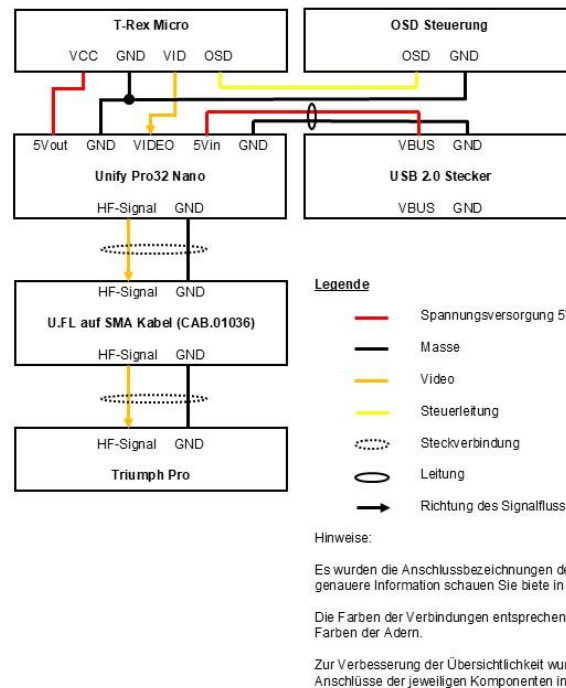


Abbildung 18 Schaltplan für die Senderseite

Der Schaltplan der Senderseite in Abbildung 18 beschreibt die elektrische Verbindung zwischen Kameraeinheit, VTX und Spannungsversorgung. Im Mittelpunkt steht die direkte Signalführung des analogen Videosignals von der Kamera T-Rex Micro bis zur Antenne Triumph Pro über den VTX Unify Pro32 Nano. Eine größere Version des Schaltplan befindet sich im Anhang 3 auf Seite H.

Die Kamera und der VTX werden mit einer Gleichspannung von 5 V versorgt. Dabei wird der VTX über einen USB 2.0 Typ A Stecker mit einer externen Powerbank verbunden. Die Versorgungsspannung sowie die Masse gibt der VTX an die Kamera weiter. Die Masse dient beiden Komponenten gleichzeitig als Bezugspotential für das CVBS, wodurch eventuelle Einkopplungen kompensiert werden sollen [55, 57, 58, 75–79].

Das CVBS der Kamera wird über dem Videoausgang der Kamera dem VTX am Videoeingang zugeführt. Besondere Aufmerksamkeit ist hierbei auf eine möglichst kurze und störungsarme Signalführung zu legen, um Signalverluste und Beeinträchtigungen der Bildqualität zu minimieren. Der HF-Ausgang sowie die Masse des VTX wird über das Koaxialkabel CAB.01036 mit der Antenne verbunden. Dabei handelt es sich an dem VTX um eine U.FL-Steckverbindung und an der Antenne um eine SMA-Steckverbindung. Von der Antenne wird

das Signal mittels Funk übertragen. Über den On-Screen Display (OSD)-Anschluss und die Masse der Kamera wird eine Steuereinheit angeschlossen, welche nur zur Konfiguration genutzt wird. Diese kann nach der Konfiguration entfernt werden [55, 57–61, 75, 80].

Der Schaltplan ist so aufgebaut, dass der Signalfluss von der Komponente oben senkrecht zu der untersten Komponente dargestellt ist. Der Signalfluss des Nutzsignales ist mit einem Pfeil gekennzeichnet. Alle anderen Komponenten, welche zur Versorgung oder Konfiguration dienen sind auf der rechten Seite dargestellt.

6.9.2 Schaltungsentwurf der Empfängerseite – Variante A

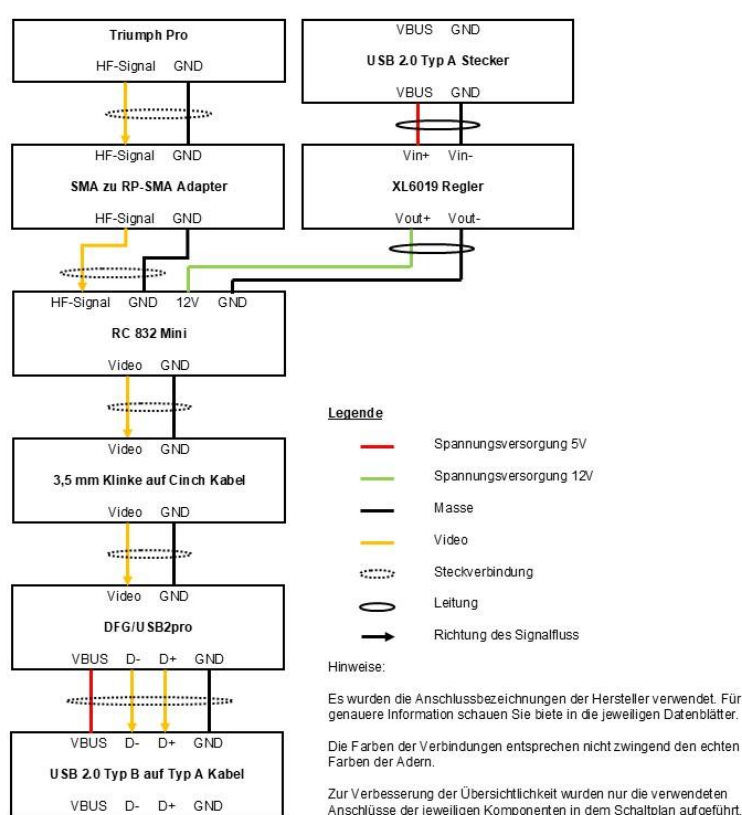


Abbildung 19 Schaltplan für die Empfängerseite - Variante A

Der Schaltplan der Empfängerseite für Variante A in Abbildung 19 beschreibt die elektrische Verbindung zwischen VRX, Digitalisierungseinheit und Spannungsversorgung. Im Mittelpunkt steht die direkte Signalführung des analogen Videosignals von der Antenne Triumph Pro über den VRX RC832 Mini zu der Digitalisierungseinheit DFG/USB2pro. Eine größere Version des Schaltplan befindet sich im Anhang 3 auf Seite I.

Der VRX wird mit einer Versorgungsspannung von 12 V betrieben. Diese wird von dem Spannungswandler XL6019 über USB 2.0 aus einer 5V-Versorgung erzeugt. Die

Digitalisierungseinheit wird über ihren USB 2.0 Typ B Anschluss von dem angeschlossenen Rechner mit Strom versorgt und benötigt daher keine zusätzliche externe Spannungsversorgung im Schaltungsentwurf [63, 64, 66, 73, 74, 76–79, 81–83].

Die Antenne empfängt das Signal der Sendereinheit und leitet dieses an den VRX weiter. Dies geschieht über den Adapter PE91263, um die Antenne mit dem SMA-Steckverbinder an den RP-SMA-Steckverbinder des VRX verbinden zu können. Der 3,5 mm Klinkenvideoausgang des VRX wird über ein Kabel mit dem Cinch-Eingang der Digitalisierungseinheit verbunden. Das digitalisierte Videosignal wird an dem USB 2.0 Typ B Anschluss der Digitalisierungseinheit bereitgestellt und kann mithilfe des USB 2.0 Typ B auf Typ A Kabel an einen Rechner übertragen werden. Eine eventuelle Konfiguration der Digitalisierungseinheit ist ebenfalls über den USB 2.0 Typ B Anschluss möglich [59, 63, 64, 66, 81, 83–85].

Der Schaltplan ist so aufgebaut, dass der Signalfluss von der Komponente oben senkrecht zu der untersten Komponente dargestellt ist. Der Signalfluss des Nutzsignales ist mit einem Pfeil gekennzeichnet. Alle anderen Komponenten, welche zur Versorgung oder Konfiguration dienen sind auf der rechten Seite dargestellt.

6.9.3 Schaltungsentwurf der Empfängerseite – Variante B

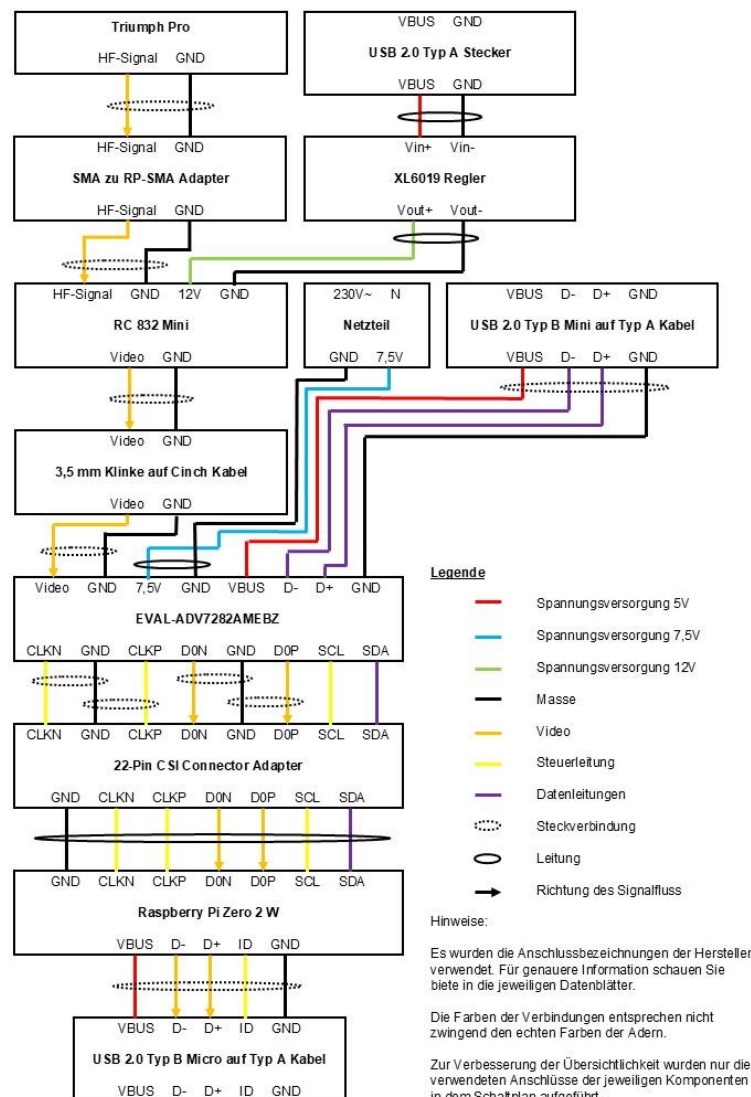


Abbildung 20 Schaltplan für die Empfängerseite - Variante B

Der Schaltplan der Empfängerseite für Variante B in Abbildung 20 beschreibt die elektrische Verbindung zwischen VRX, der Digitalisierungseinheit und Spannungsversorgung. Im Mittelpunkt steht die direkte Signalführung des analogen Videosignals von der Antenne Triumph Pro über den VRX RC832 Mini zu der Digitalisierungseinheit in Form des EVAL-ADV7282AMEBZ und des Raspberry Pi Zero 2 W. Eine größere Version des Schaltplan befindet sich im Anhang 3 auf Seite J.

Der VRX wird mit einer Versorgungsspannung von 12 V betrieben. Diese wird von dem Spannungswandler XL6019 über USB 2.0 aus einer 5V-Versorgung erzeugt. Das EVAL-ADV7282AMEBZ benötigt 7,5 V Versorgungsspannung. Diese werden über ein

mitgeliefertes Netzteil bereitgestellt. Der Raspberry Pi Zero 2 W wird über den USB 2.0 Typ B Micro Anschluss von dem angeschlossenen Rechner mit Strom versorgt und benötigt daher keine zusätzliche externe Spannungsversorgung im Schaltungsentwurf [63, 64, 67–71, 73, 74, 76–79, 82, 86–88].

Die Antenne empfängt das Signal der Sendereinheit und leitet dieses an den VRX weiter. Dies geschieht über den Adapter PE91263, um die Antenne mit dem SMA-Steckverbinder an den RP-SMA-Steckverbinder des VRX verbinden zu können. Der 3,5 mm Klinkenvideoausgang des VRX wird über ein Kabel mit dem Cinch-Eingang des EVAL-ADV7282AMEBZ verbunden. Das digitalisierte Videosignal wird von dem EVAL-ADV7282AMEBZ über die MIPI CSI-2 D-Phy Anschlüsse bereitgestellt. Dafür stehen vier SMA-Steckverbindungen an dem EVAL-ADV7282AMEBZ zur Verfügung. An jedem der SMA-Steckverbinder wird differentiell ein Signal und die Masse bereitgestellt. Die vier Signale sind die zwei differentiellen Datenleitungen und die zwei differentiellen Taktleitungen. Zusätzlich muss über eine Lötverbindung das Daten- und Taktsignal der I2C-Verbindung hergestellt werden. Da der Raspberry Pi Zero 2W diese Signale nur über einen 22-Pin CSI Anschluss empfangen kann, müssen die Signale und die Masse des EVAL-ADV7282AMEBZ über den Adapter zu einem 22-Pin CSI Anschluss verbunden werden. Dadurch lässt sich der Raspberry Pi Zero 2 W mit dem Adapterboard über eine 22-Pin Flachbandkabel verbinden. Das digitale Videosignal wird anschließend über den Raspberry Pi Zero 2 W zu einem UVC-kompatiblen Datenstrom gewandelt und über den USB 2.0 Typ B Micro Anschluss bereitgestellt. Die Konfiguration der Digitalisierungseinheitskomponenten ist über die jeweiligen USB 2.0 Typ B Micro und Mini Anschlüsse möglich [59, 63, 64, 67–71, 84–93].

Der Schaltplan ist so aufgebaut, dass der Signalfluss von der Komponente oben senkrecht zu der untersten Komponente dargestellt ist. Der Signalfluss des Nutzsignales ist mit einem Pfeil gekennzeichnet. Alle anderen Komponenten, welche zur Versorgung oder Konfiguration dienen sind auf der rechten Seite dargestellt.

6.9.4 Zusammenfassung

Die dargestellten Schaltpläne bilden die vollständige elektrische Umsetzung der im Systementwurf definierten Systemarchitektur unter Einbeziehung der gewählten Komponenten ab. Der Schaltungsentwurf stellt damit die unmittelbare Grundlage für die nachfolgende Implementierung des Systems dar.

7 Implementierung

Ziel dieses Kapitels ist die praktische Umsetzung der im Detailentwurf entwickelten Systemarchitektur sowie der zugehörigen Schaltungen für die Sender- und Empfängerseite. Aufbauend auf den in Kapitel 6 definierten Komponenten und Schaltungsentwürfen wird ein funktionsfähiger Referenzaufbau realisiert, der die analoge Videoübertragung über eine Funkstrecke sowie die anschließende Digitalisierung des Signals ermöglicht. Im Fokus dieses Kapitels steht die technische Realisierung und Integration der einzelnen Systemkomponenten. Die systematische Untersuchung der Funktionalität sowie die Durchführung der einzelnen Funktionstests erfolgen im nachfolgenden Kapitel 8.

7.1 Umsetzung der Senderseite

Die Senderseite wurde entsprechend des im Detailentwurf beschriebenen Schaltungsentwurfs nach dem Schaltplan der Senderseite (siehe Kapitel 6.9.1) realisiert und besteht aus der Kameraeinheit, der Sendeeinheit und Antenne zur drahtlosen Übertragung des Videosignals. Als Kamera wurde die im Detailentwurf ausgewählte FPV-Kamera T-Rex Micro eingesetzt, welche ein CVBS bereitstellt. Dieses analoge Videosignal wird über eine Leitung aus verdrehten Adern direkt dem Videoeingang des VTX zugeführt. Der VTX Unify Pro32 Nano übernimmt die FM des CVBS auf ein hochfrequentes Trägersignal im 5,8-GHz-Bereich und strahlt dieses über die angeschlossene Antenne ab. Dabei wurde darauf geachtet, die Verbindung zwischen Kamera und Sender möglichst kurz zu halten, um Signalverluste und Störeinflüsse zu minimieren. Im Rahmen der praktischen Umsetzung ergab sich eine Abweichung hinsichtlich der Verbindung zwischen Sendeeinheit und Antenne. Aufgrund einer Fehlinformation zwischen Entwickler und der Beschaffung wurde anstatt eines 300 mm Koaxialkabel ein 75 mm Koaxialkabel bestellt. Um dennoch eine funktionale Verbindung herzustellen, wurde ein zusätzliches Koaxialkabel des Typus RG178 zur Verlängerung eingesetzt. Gemäß den Formeln (11), (14) und (15) ergibt sich somit eine neue Leitungsdämpfung durch die zwei Koaxialkabel [94].

$$G_{5,7 \text{ GHz}, 250 \text{ mm}} = \frac{G_{6 \text{ GHz}} - G_{5,2 \text{ GHz}}}{f_{\Delta}} \cdot 0,5 \text{ GHz} + G_{5,2 \text{ GHz}} \quad (14)$$

$$G_{5,7 \text{ GHz}, 250 \text{ mm}} = \frac{4,9 \frac{\text{dB}}{\text{m}} - 4,5 \frac{\text{dB}}{\text{m}}}{0,8 \text{ GHz}} \cdot 0,5 \text{ GHz} + 4,5 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$$

$$G_{5,7 \text{ GHz}, 250 \text{ mm}} = 4,75 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$$

$$L_{K,real} = \frac{G_{5,7 \text{ GHz}}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}} \cdot l_K + \frac{G_{5,7 \text{ GHz}, 250 \text{ mm}}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}} \cdot l_K \quad (15)$$

$$L_{K,real} = \frac{5,295 \frac{\text{dB}}{\text{m}}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}} \cdot 75 \text{ mm} + \frac{4,75 \frac{\text{dB}}{\text{m}}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}} \cdot 250 \text{ mm}$$

$$L_{K,real} = 1,585 \text{ dB}$$

Die Anpassung führt zu einer Leitungsdämpfung von circa 1,585 dB und ist somit nur minimal kleiner als die geplante Leitungsdämpfung innerhalb des Systems. Somit wird die maximal zulässige EIRP nicht überschreiten. Die Spannungsversorgung der Senderseite wurde entsprechend der Anforderung NFA-07 mit 5 V durch eine Powerbank bereitgestellt. Dabei wurde auf eine stabile Versorgung geachtet, um einen zuverlässigen Betrieb der Sendeeinheit sicherzustellen.

7.2 Umsetzung der Empfängerseite

7.2.1 Grundaufbau

Die Empfangseinheit wurde auf Basis des im Detailentwurf definierten Konzepts realisiert und dient der Demodulation des über die Funkstrecke übertragenen Videosignals. Zentrales Element ist der VRX RC832 Mini, der das hochfrequente Empfangssignal verarbeitet und wieder in ein CVBS überführt. Das am Ausgang des Empfängers bereitgestellte CVBS steht anschließend für die weitere Verarbeitung durch die nachgeschaltete Digitalisierungseinheit zur Verfügung. Damit bildet die Empfangseinheit die Schnittstelle zwischen der drahtlosen Übertragung und der digitalen Weiterverarbeitung des Videosignals. Der VRX ist mit der gleichen Antenne wie auf der Senderseite ausgestattet. Die Ausrichtung der Antenne wurde so gewählt, dass eine möglichst stabile Signalübertragung gewährleistet wird. Zur Verbindung der Antenne mit dem Empfänger kam ein Adapter zwischen RP-SMA-Stecker und SMA-Buchse zum Einsatz. Im Rahmen der praktischen Umsetzung ergab sich hierbei eine Abweichung gegenüber dem Detailentwurf: Aufgrund einer Fehlkommunikation zwischen

Entwickler und der Beschaffungsstelle wurde anstelle des Winkeladapters PE91263 der gerade Antennenadapter 88728 der Marke Delock bestellt. Dies führt zu einer eingeschränkten mechanischen Flexibilität bei der Ausrichtung der Antenne. Die grundsätzliche Funktion der Empfangseinheit sowie die Fähigkeit zur Signalübertragung bleiben hiervon jedoch unbeeinträchtigt, wodurch der Aufbau weiterhin für die vorgesehenen Untersuchungen genutzt werden kann. Die Spannungsversorgung des VRX von 12 V wurde mithilfe des Spannungswandlers XL6019 bereitgestellt. Dabei wandelt der XL6019 5 V aus einer USB-Spannungsversorgung um. Somit kann der VRX durch einen USB-Anschluss des Rechners versorgt werden. Dabei wurde auf eine stabile Versorgung geachtet, um einen zuverlässigen Betrieb der Sendeeinheit sicherzustellen [95].

7.2.2 Variante A: Digitalisierung mittels USB-Videokonverter

In der ersten Variante der Digitalisierung wird das von dem VRX bereitgestellte CVBS dem USB-Videokonverter DFG/USB2pro zugeführt. Dieser übernimmt die Analog-Digital-Wandlung des Videosignals sowie dessen Bereitstellung in Form eines digitalen Datenstroms über eine USB-Schnittstelle. Die Verbindung zwischen VRX und Videokonverter erfolgt über das bei dem VRX mitgelieferte Kabel. Der Videokonverter wird anschließend über ein USB-Kabel direkt mit einem Rechner verbunden und stellt die Schnittstelle zur Darstellung des Videosignals dar. Die Spannungsversorgung der Digitalisierungseinheit wurde über den USB-Anschluss an einen Rechner bereitgestellt. Dabei wandelt der XL6019 5 V aus einer USB-Spannungsversorgung um.

Für den Betrieb des DFG/USB2pro ist die Installation des herstellerspezifischen Treibers erforderlich. Entgegen der im Kapitel 2.5.2 beschriebenen allgemeinen Plug-and-Play-Funktionalität von USB-Geräten wird das Gerät ohne diesen Treiber nicht automatisch als Videoeingangsgerät vom Betriebssystem erkannt. Erst nach erfolgreicher Installation des Treibers wird der Videokonverter korrekt in das System eingebunden und steht als Videoquelle zur Verfügung. In diesem Zustand kann das Videosignal von geeigneter Software erfasst, verarbeitet und dargestellt werden. Die Integration in das bestehende System erfolgt anschließend ohne weitere Einschränkungen [66].

7.2.3 Variante B: Digitalisierung mittels Video-Decoder und Einplatinencomputer

In der zweiten Variante erfolgt die Digitalisierung des analogen Videosignals mithilfe Video-Decoder-IC ADV7282AM in Kombination mit dem Einplatinencomputer Raspberry Pi Zero 2W. Ziel dieses Ansatzes ist eine direkte Weiterverarbeitung der digitalisierten Bilddaten innerhalb eines eingebetteten Systems. Das vom VRX bereitgestellte CVBS wird dem Video-Decoder zugeführt. Dieser übernimmt die Signalaufbereitung, die Synchronisationsdetektion sowie die Analog-Digital-Wandlung. Der resultierende digitale Videodatenstrom wird anschließend über eine MIPI-CSI-Schnittstelle an den Einplatinencomputer übertragen, welcher die weitere Verarbeitung und Bereitstellung des Videosignals an einen Rechner ermöglicht.

Im Rahmen der praktischen Umsetzung trat ein wesentliches Problem bei der Inbetriebnahme des verwendeten Entwicklungsboards EVAL-ADV7282AMEBZ auf. Obwohl die zur Konfiguration erforderliche Software „DVP Eval Last Source 10-14-11“ von Analog Devices gemäß der Anleitung des Entwicklungsboards erfolgreich installiert werden konnte und korrekt ausgeführt wird, wird die USB-Schnittstelle des Entwicklungsboards vom Rechner nicht erkannt. Dadurch ist weder ein Zugriff auf das Board noch eine Konfiguration der relevanten Parameter möglich. Zur Klärung dieses Problems wurde Kontakt mit dem technischen Support des Herstellers Analog Devices aufgenommen. Trotz dieser Maßnahmen konnte bis zum Abschluss der Bearbeitungszeit der Diplomarbeit keine Lösung für die fehlende Schnittstellenerkennung gefunden werden [69, 96].

Aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur Inbetriebnahme des Systems sowie des damit verbundenen zeitlichen und technischen Aufwands wurde in Abstimmung zwischen Entwickler und Auftraggeber entschieden, diese Variante im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit nicht weiter zu verfolgen. Stattdessen wurde der Fokus auf die funktionsfähige und vollständig integrierbare Variante A gelegt.

7.3 Konfiguration der Systemkomponenten

Für den Betrieb des Gesamtsystems ist eine gezielte Konfiguration der verwendeten Komponenten erforderlich. Diese betrifft insbesondere die Kameraeinheit, den VTX sowie den VRX und stellt sicher, dass eine kompatible Signalübertragung innerhalb des Systems gewährleistet ist.

Die eingesetzte Kamera ermöglicht die Anpassung grundlegender Videoeinstellungen über einen mitgelieferten OSD-Controller. Im Rahmen der Implementierung wurde die Kamera gemäß der Anleitung so konfiguriert, dass ein Seitenverhältnis von 4:3 verwendet wird. Diese Einstellung entspricht den im theoretischen Hintergrund betrachteten Eigenschaften des CVBS (siehe Kapitel 2.1.3). Darüber hinaus wurde als Videosignalstandard die PAL-Norm eingestellt, wie es in Kapitel 5.4.1 festgelegt wurde [75].

Die Konfiguration des VRX erfolgt gemäß den Vorgaben der Anleitung des Herstellers über ein integriertes Bedienelement. Über dieses können das verwendete Frequenzband, der konkrete Übertragungskanal sowie die Sendeleistung eingestellt werden. Im Rahmen der Implementierung wurden Kanal 1 im Band B mit einer Sendeleistung von 25 mW eingestellt. Die weiteren Parameter sind für den Referenzaufbau irrelevant und wurden auf den Voreinstellungen gemäß Anleitung belassen. Die Wahl des Kanals und des Bandes wurde so getroffen, dass man die niedrigste erlaubte Frequenz nutzen kann. Dies entspricht in Deutschland im 5,8-GHz-Bereich der Frequenz von 5,733 GHz [57].

Für eine erfolgreiche Signalübertragung ist es erforderlich, dass der VRX auf identische Übertragungsparameter eingestellt ist. Daher wurde der Empfänger auf dasselbe Frequenzband sowie den gleichen Kanal wie der VRX konfiguriert. Nur bei Übereinstimmung dieser Parameter ist eine fehlerfreie Demodulation des Videosignals möglich. Die Einstellung erfolgt gemäß Anleitung über zwei Taster. Der linke Taster schaltet das Frequenzband und der rechte Taster den Kanal weiter. Die richtige Einstellung ist getroffen, wenn auf dem Bildschirm die Zahl 21 dargestellt wird [63].

Durch die abgestimmte Konfiguration der genannten Komponenten wird sichergestellt, dass das von der Kamera erzeugte Videosignal über die Funkstrecke übertragen und am Empfänger korrekt wieder bereitgestellt werden kann.

7.4 Verwendete Software

Für die Inbetriebnahme und Nutzung der Digitalisierungseinheit in Variante A sowie für die Darstellung des Videosignals auf einem Rechner kommen verschiedene Softwarekomponenten zum Einsatz. Zuerst ist für den Betrieb des verwendeten USB-Videokonverters die Installation eines herstellereigenen Treibers erforderlich. Dieser stellt die notwendige Schnittstelle zwischen Hardware und Betriebssystem bereit und ermöglicht es dem Rechner, das angeschlossene Gerät korrekt zu erkennen und als Videoeingangsquelle zu

nutzen. Ohne diesen Treiber ist keine Nutzung der Digitalisierungseinheit möglich. Der Treiber kann auf der Produktseite des Herstellers gedownloadet werden [66].

Nach erfolgreicher Treiberinstallation wird der Videokonverter vom Betriebssystem als Videoeingabegerät erkannt und kann von geeigneter Software angesprochen werden. Für die Darstellung des empfangenen Videosignals wurde unter anderem die vom Hersteller bereitgestellte Endnutzer-Software IC Capture 4 verwendet. Diese ermöglicht eine direkte Wiedergabe des digitalen Videodatenstroms sowie grundlegende Funktionen zur Anzeige und Verarbeitung des Signals. Dazu zählt u.a. auch die Möglichkeit der Aufnahme des Videodatenstroms [66].

Alternativ kann das Videosignal auch mithilfe externer Softwarelösungen verarbeitet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierfür auch der VLC Media Player eingesetzt. Dieser bietet die Möglichkeit, Videoeingabegeräte direkt anzusprechen und den empfangenen Datenstrom darzustellen. Die Nutzung des VLC Media Players stellt eine flexible und plattformunabhängige Alternative zur herstellerspezifischen Software dar und ermöglicht eine einfache Integration der Digitalisierungseinheit in unterschiedliche Systemumgebungen [97].

Um den Videodatenstrom korrekt anzeigen zu können, muss zuvor das Eingabegerät in der Software konfiguriert werden. Wie diese Konfiguration erfolgt, wird im Anhang 4 erklärt. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Softwareversionen, den jeweiligen Bezugsquellen der Programme sowie den zugehörigen Dateipfaden zu dem digitalen Anhang sind dem Anhang 5 dieser Arbeit zu entnehmen.

7.5 Mechanische Umsetzung

Eine Vielzahl der verwendeten Komponenten in dem Referenzaufbau sind klein und somit anfälliger gegenüber mechanischer Beanspruchung. Des Weiteren ist der Transport der einzelnen Komponenten für einen Test aufwendig und birgt die Gefahr der Beschädigung von Lötverbindungen und Anschlüssen. Aus diesen Gründen wurde der Aufbau der Sender- als auch der Empfängerseite auf jeweils einer Trägerplatte realisiert. Als Basismaterial wurde hierfür eine Mitteldichte Faserplatte gewählt, da diese eine ausreichende Stabilität bietet. Die einzelnen Komponenten wurden mithilfe speziell angefertigter Halterungen auf den Trägerplatten befestigt. Diese Halterungen wurden im 3D-Druckverfahren hergestellt und ermöglichen eine positionsgenaue sowie mechanisch stabile Fixierung der Bauteile. Durch

diese Form der Montage wird sowohl die mechanische Belastung der elektrischen Verbindungen reduziert.

Für die Konstruktion der 3D-Druckteile wurde die Software Autodesk Inventor Professional 2025 verwendet. Die Auslegung der Halterungen erfolgte unter Berücksichtigung der geometrischen Abmessungen der jeweiligen Komponenten sowie der Anforderungen an eine sichere Befestigung und Zugänglichkeit. Die entsprechenden Konstruktionszeichnungen und Modelle der 3D-Druckteile sind im Anhang 6 dargestellt. Zum Drucken der Halterungen wurde der MakerBot Replicator 2 angewendet. Als Filament wurde sich für ein weißes Polymilchsäure-Filament, kurz PLA, entschieden, da somit der Kontrast zwischen den Halterungen und den Komponenten erhöht werden konnte und diese sich besser voneinander abheben.

Durch die gewählte mechanische Ausführung wird einerseits eine erhöhte Robustheit des Gesamtsystems erreicht und andererseits eine verbesserte Anschaulichkeit des Aufbaus ermöglicht, was insbesondere für Demonstrations- und Untersuchungszwecke von Vorteil ist.

7.6 Herausforderungen und Abweichungen bei der Umsetzung

Im Rahmen der praktischen Umsetzung ergaben sich mehrere Abweichungen und technische Herausforderungen gegenüber dem im Detailentwurf beschriebenen System. Eine wesentliche Schwierigkeit lag in der Abstimmung zwischen Entwicklung und Beschaffung, wodurch es in einzelnen Fällen zur Lieferung ungeeigneter Verbindungselemente kam und Anpassungen im Aufbau erforderlich wurden. Auf der Senderseite betraf dies die Verbindung zwischen Sendeeinheit und Antenne, weshalb ein zusätzliches Verlängerungskabel eingesetzt wurde. Die daraus resultierende Dämpfung wurde bei der Auslegung der Systemparameter, insbesondere im Hinblick auf die Einhaltung der EIRP, berücksichtigt. Auf der Empfängerseite ergab sich eine Abweichung bei der mechanischen Integration der Antenne durch den Einsatz eines anderen Koaxialadapters, wodurch die Ausrichtbarkeit eingeschränkt ist, die Funktionsfähigkeit des Systems jedoch nicht beeinträchtigt wird. Die größte Herausforderung stellte die Integration der Digitalisierungseinheit nach Variante B dar. Aufgrund von Problemen bei der Inbetriebnahme des Entwicklungsboards konnte diese Variante nicht realisiert werden, da die fehlende Erkennung der USB-Schnittstelle eine Konfiguration verhinderte. Sie wurde daher im weiteren Verlauf der Arbeit nicht berücksichtigt.

7.7 Darstellung des realisierten Referenzaufbau

Nach der Umsetzung der einzelnen Komponenten und deren Integration wurde ein vollständiger Referenzaufbau der Sender- und Empfängerseite realisiert. Zur Veranschaulichung des mechanischen und elektrischen Gesamtaufbaus sind in den folgenden Abbildungen die fertig implementierten Systeme dargestellt.

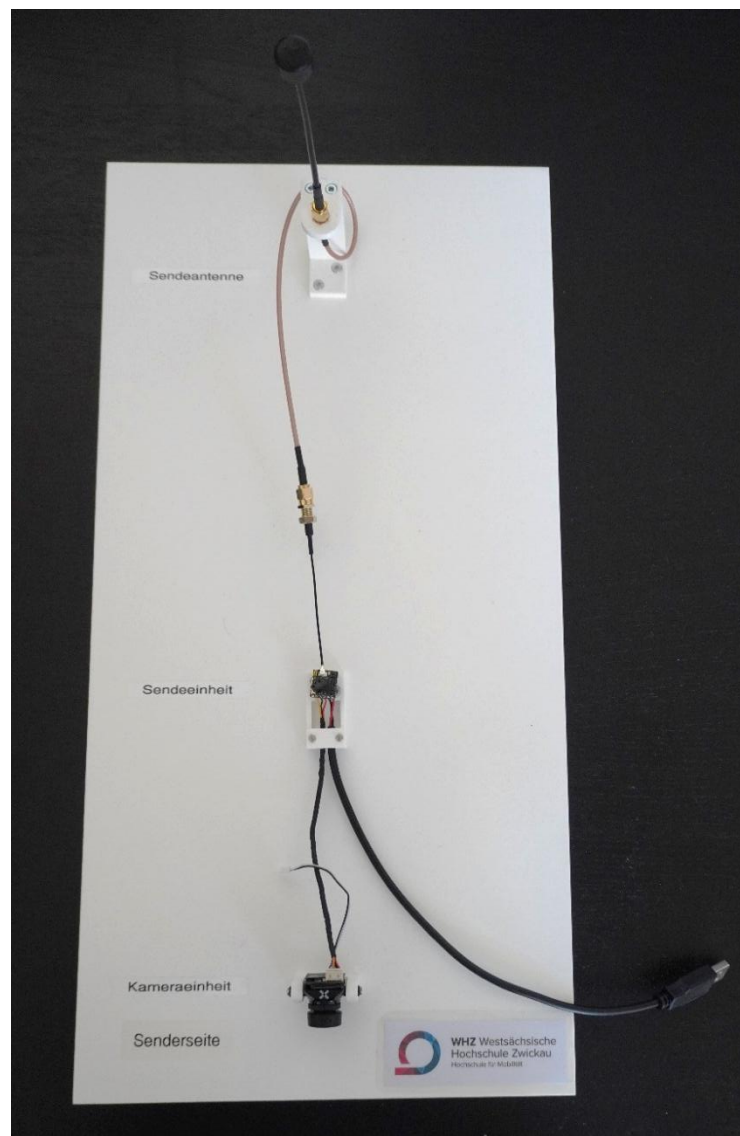


Abbildung 21 Referenzaufbau Senderseite

In Abbildung 21 ist die realisierte Senderseite zu sehen. Erkennbar sind die Kameraeinheit, die Sendeeinheit sowie die Sendeantenne. Das USB-Kabel zur Spannungsversorgung ist am unteren rechten Rand zu sehen. Darüber hinaus wird die mechanische Integration der

Komponenten auf der Trägerplatte sowie deren Befestigung mittels der angefertigten Halterungen veranschaulicht.

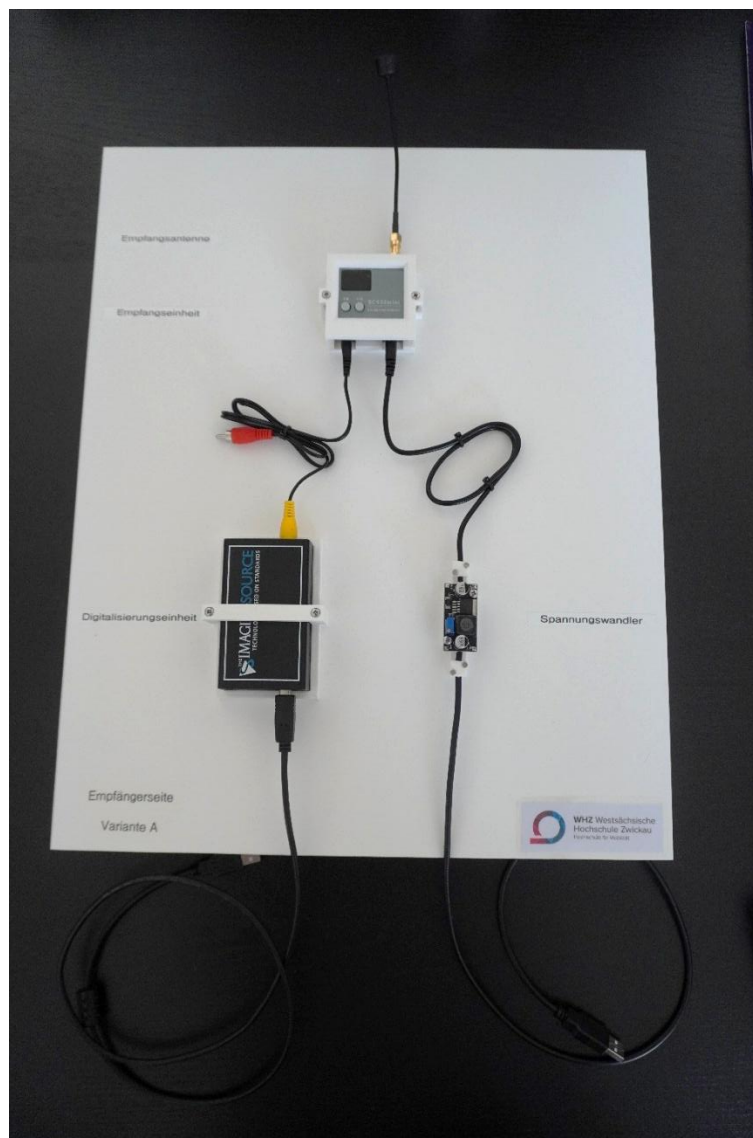


Abbildung 22 Referenzaufbau Empfängerseite nach Variante A

In Abbildung 22 ist die Empfängerseite nach Variante A zu sehen. Hier sind die Empfangsantenne, der Empfangseinheit sowie die Digitalisierungseinheit in Form des USB-Videoconverters zu erkennen. Der Spannungswandler zur Versorgung der Empfangseinheit ist unten rechts abgebildet. Darüber hinaus wird die mechanische Integration der Komponenten auf der Trägerplatte sowie deren Befestigung mittels der angefertigten Halterungen veranschaulicht. Die Abbildungen verdeutlichen die praktische Umsetzung der im Detailentwurf entwickelten Systemarchitektur und geben einen Überblick über die räumliche Anordnung sowie die Integration der einzelnen Komponenten.

8 Verifikation

Ziel der Verifikation ist die Überprüfung, ob das implementierte System die in Kapitel 4 definierten Anforderungen erfüllt. Dabei wird das System hinsichtlich seiner Funktionalität, Leistungsfähigkeit und Qualität untersucht und bewertet. Die Ergebnisse der Verifikation dienen als Grundlage für das abschließende Fazit des Systems. Die einzelnen Tests basieren auf den im Kapitel 4.8 definierten Verifikationsmethoden und umfasst verschiedene Testkategorien. Die Tests werden so gestaltet, dass eine möglichst umfassende Bewertung des Systems möglich ist.

8.1 Funktionstests

8.1.1 Kamera

Dem System soll ein CVBS als Ausgangssignal dienen (FA-01, siehe Kapitel 4.5). Es wurde sich im Kapitel 5.4.1 für PAL als Farbkodierungsverfahren entschieden. Um eine korrekte Signalverarbeitung in den weiteren Komponenten zu gewährleisten, soll deshalb nachgewiesen werden, dass es sich bei dem Ausgangssignal der eingesetzten Foxeer T-Rex Micro um ein CVBS mit PAL handelt. Dazu wurde das mitgelieferte Anschlusskabel mit Verlängerungen verlötet, um die Spannungsversorgung über Kroko-Klemmen herstellen zu können, sowie den Cinch-Anschluss an einen Bildschirm führen zu können. Dabei ist das rote Kabel die 5V Versorgung, das schwarze Kabel die Masse, welche sowohl mit der Spannungsversorgung als auch dem Cinch-Anschluss verbunden ist, und das gelbe Kabel für das Videosignal. Das lila Kabel ist ein Anschluss zur Spannungsermittlung der Versorgung, welche jedoch nur in dem eigentlichen Einsatzgebiet des Modellbaus relevant ist und hier somit keine Anwendung findet. Diese beschriebene Verdrahtung ist in Abbildung 23 dargestellt. Das Videosignal und die Masse werden über einen Cinch-Stecker mit Schraubanschlüssen verbunden und dem Bildschirm mit Composite Video Anschluss zugeführt. Dies ist in Abbildung 24 dargestellt.

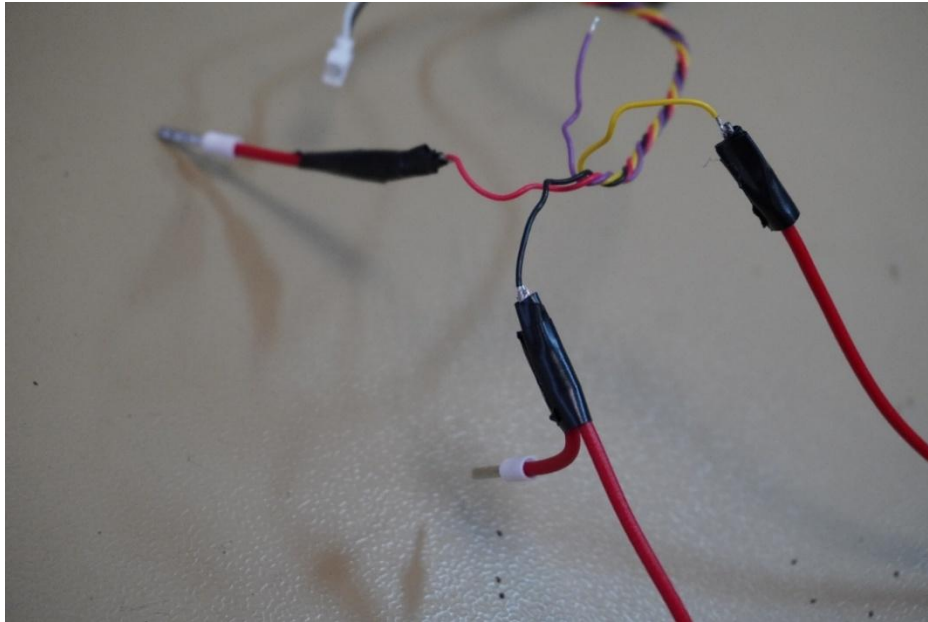


Abbildung 23 Nahaufnahme der Verdrahtung der Kamera

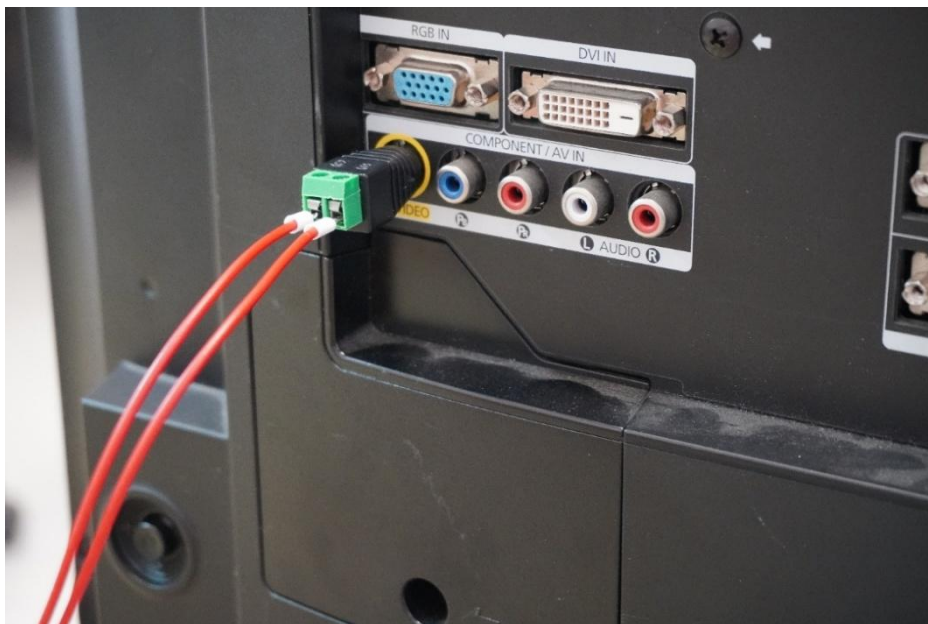


Abbildung 24 Cinch-Stecker mit Schraubanschluss an Composite Video Anschluss eines Fernsehers

Die Spannungsversorgung von 5 Volt wird mit einem Statron Labornetzgerät Typ 2223 bereitgestellt. Nach einer Prüfung der exakten Spannung mit einem Alcron DT-64 Digitalmultimeter, welche in Abbildung 25 dargestellt ist, wurde alles miteinander verbunden. Nach Anschalten des Labornetzgerätes wurde auf dem Fernseher ein Bild ausgegeben. Diese ist mit einem Verhältnis von 4:3 und PAL-Farbkodierungsnorm konfiguriert, wie auf Abbildung

26 zu sehen ist. Jedoch wurde es trotzdem durch den Bildschirm als 16:9 dargestellt. Dies lag jedoch an den Einstellungen des Fernsehers und stellt somit keine Einschränkung dar.

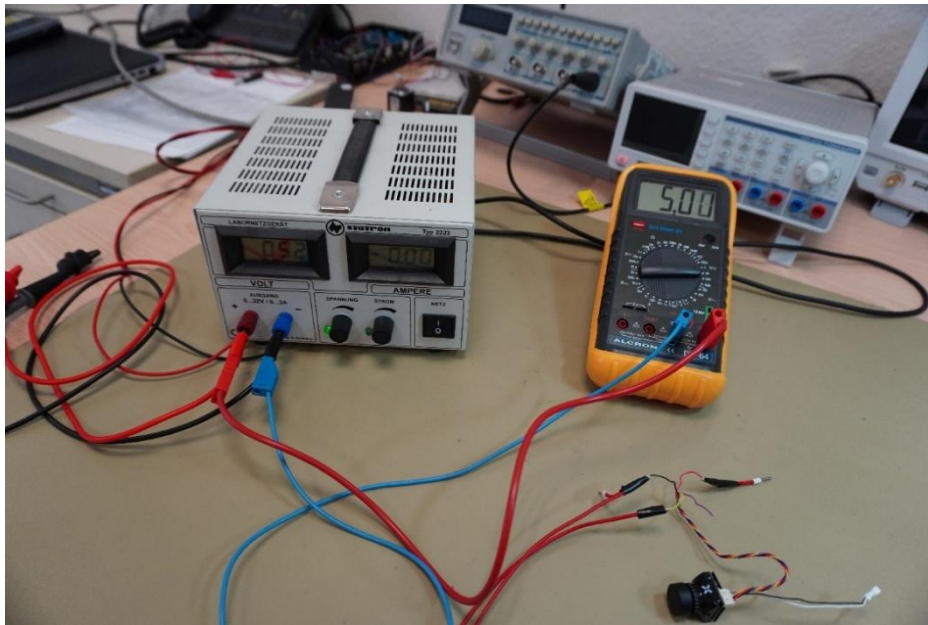


Abbildung 25 Spannungsmessung des Labornetzgerätes mit einem Digitalmultimeter

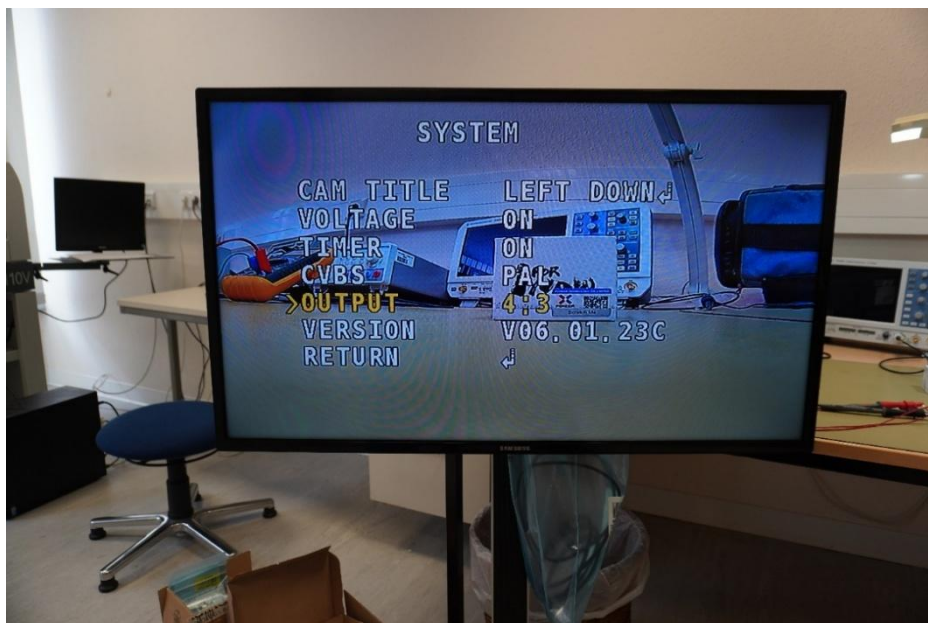


Abbildung 26 Ausgabe des CVBS auf einem Fernseher

Für den genauen Nachweis, dass es sich um ein CVBS mit PAL-Farbkodierungsnorm handelt, wurde abschließenden noch eine Aufnahme des Signals mit dem Oszilloskop RTB2004 der Marke Rhode und Schwarz durchgeführt. Der Abschlusswiderstand, welcher bei CVBS 75 Ω beträgt, wurde mit einer Reihenschaltung aus einem 27 Ω - und 47 Ω -Widerstand

realisiert, wie in Abbildung 27 zu sehen ist. Somit ist eine Abweichung von $1\ \Omega$ vorhanden, was jedoch nicht anders realisierbar war, da nur Widerstände der E12-Reihe vorhanden waren. Jedoch ist aufgrund der Toleranz von 10% bei dieser E-Reihe ein Widerstand von $74,75\ \Omega$ realisiert wurden.

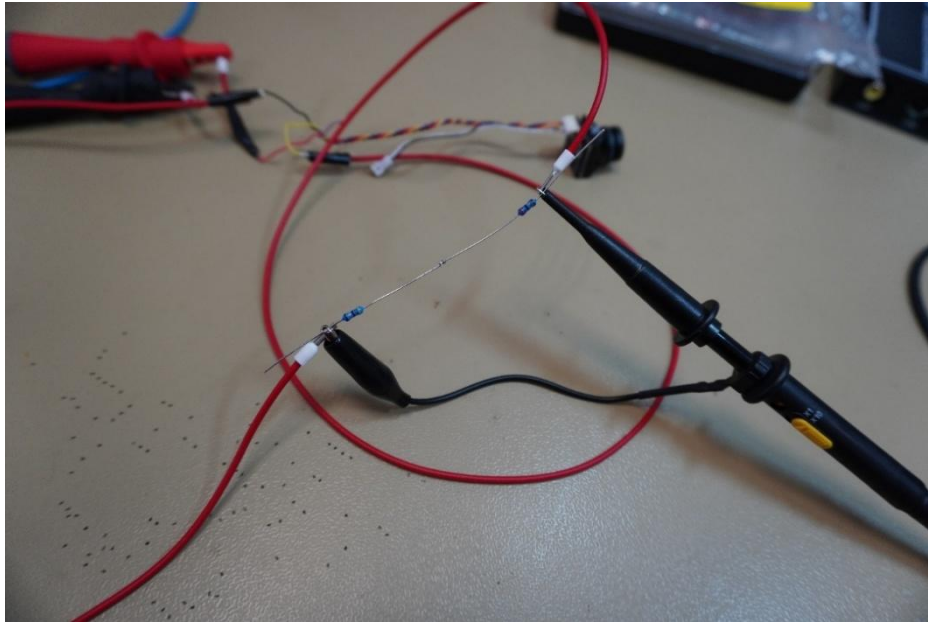


Abbildung 27 Abschlusswiderstand bei der Messung des CVBS der Kamera



Abbildung 28 Oszillogramm einer Bildzeile des CVBS der Kamera, mit Messung der Bildzeilendauer



Abbildung 29 Oszillogramm einer Bildzeile des CVBS der Kamera, mit Messung der sichtbaren Bildzeilendauer

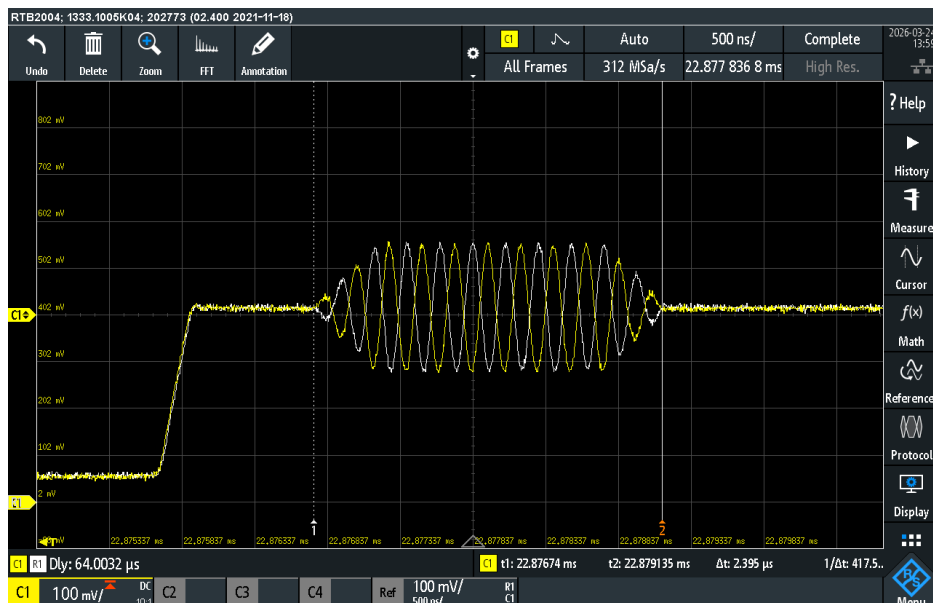


Abbildung 30 Vergleich der Farbträgerbursts zwei aufeinanderfolgender Bildzeilen

In Abbildung 28 ist eine vollständige Bildzeile des Videosignales der Kamera dargestellt. Diese hat eine Dauer von $64 \mu\text{s}$, wie gemessen wurde. In Abbildung 29 wurde eine Dauer von rund $52 \mu\text{s}$ für den Sichtbaren Teil einer Zeile gemessen. In Abbildung 30 ist ein Vergleich von zwei Farbträgerbursts dargestellt. Dabei ist das weiße Signal der Farbträgerburst der aktuellen Zeile und das gelbe Signal der Farbträgerburst der vorherigen Bildzeile. Wie

zusehen sind die beiden genau 180° zueinander Phasenverschoben. Diese Eigenschaft entspricht genau der PAL-Farbkodierung, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben.

Anhand der durchgeführten Messungen ließ sich nachweisen, dass es sich bei dem durch die Kamera bereitgestellten Videosignal um ein CVBS nach PAL-Farbkodierungsnorm handelt. Somit erfüllt die Kamera die Anforderung FA-01 und ist für den Einsatz in dem System geeignet.

8.1.2 Funkstrecke

Der zu realisierende Referenzaufbau soll ein CVBS der Kameraeinheit gemäß den Anforderungen FA-02 und FA-03 aus Kapitel 4.5 über Analogfunk übertragen können und wieder als analoges Videosignal ausgeben. Somit soll mit diesem Funktionstest nachgewiesen werden, dass der VTX Unify Pro32 Nano der Marke TBS, der VRX RC832 Mini, die Antennen Triumph Pro der Marke TBS und das Koaxialkabel des Herstellers Taoglas Limited diese Anforderungen erfüllen.

Dazu wurde der VTX und die bereits verifizierte Kameraeinheit gemäß dem Schaltplan der Senderseite aus Kapitel 6.9.1 miteinander verlötet. Das Koaxialkabel sowie die Sendeanenne wurden an den VTX angebunden. Die Spannungsversorgung erfolgt wie in Kapitel 6.6 beschrieben über eine Powerbank. Dieser Versuchsaufbau ist in Abbildung 31 Versuchsaufbau zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Funkverbindung auf der Senderseite abgebildet. Auf der Empfängerseite wurde die Empfangsantenne, der VRX, und der verifizierte Spannungswandler XL6019 (siehe Kapitel 8.1.5) gemäß dem Schaltplan der Empfängerseite nach Variante A aus Kapitel 6.9.2 miteinander verschaltet. Das rekonstruierte Videosignal und die Masse aus dem VRX werden an einen Cinch-Stecker mit Schraubanschlüssen angeschlossen und dem Bildschirm mit Composite Video Anschluss zugeführt. Dies ist in Abbildung 32 dargestellt. Anschließend wurden das Labornetzgerätes auf der Empfängerseite und die Powerbank auf der Senderseite angeschlossen und angeschaltet. Nach dem der VTX und der VRX gemäß Kapitel 7.3 konfiguriert waren, wurde auf dem TV wurde ein Bild ausgegeben. Dieses wurde wie schon in Kapitel 8.1.1 durch den Bildschirm als 16:9 dargestellt, obwohl das CVBS als 4:3 durch die Kameraeinheit konfiguriert war. Dies ist in Abbildung 33 abgebildet.



Abbildung 31 Versuchsaufbau zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Funkverbindung auf der Senderseite

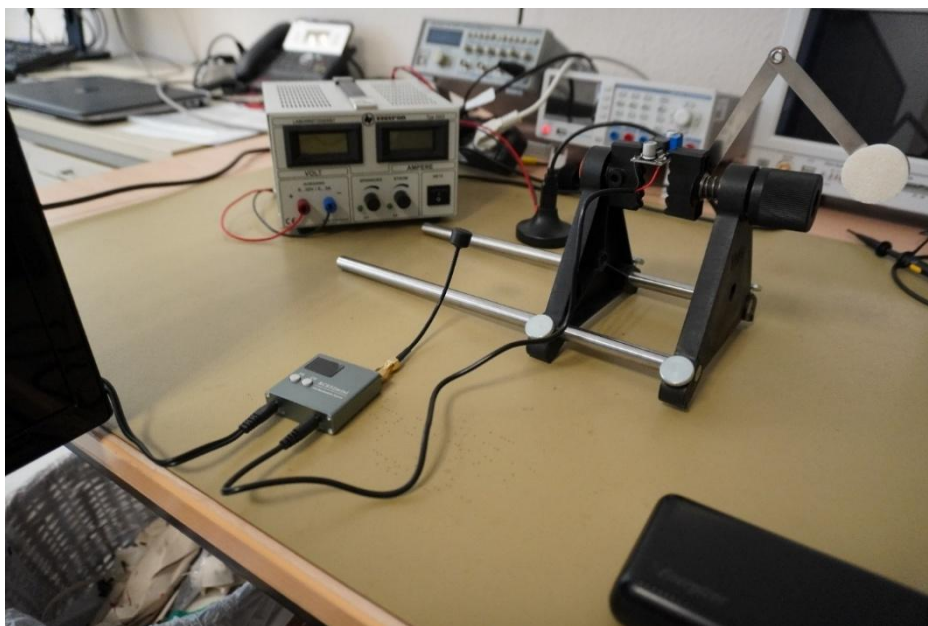


Abbildung 32 Versuchsaufbau zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Funkverbindung auf der Empfängerseite



Abbildung 33 Ausgabe des per Analogfunk übertragenen CVBS auf einem Fernseher

Anhand des erfolgreichen Funktionstests lässt sich nachweisen, dass die im Detailentwurf (siehe Kapitel 6.2 ff.) gewählten Komponenten ein CVBS per Analogfunk übertragen können und anschließend wieder in ein analoges Videosignal rekonstruieren. Somit sind die Anforderungen FA-02 und FA-03 erfüllt und die Komponenten der Funkstrecke für einen Einsatz in dem Referenzaufbau geeigneten sind.

8.1.3 Digitalisierungseinheit Variante A

Die Digitalisierungseinheit in der Variante A vereint gemäß Kapitel 6.5.1 die Funktionen der Video-Digitalisierung und der standardisierten Schnittstelle zum Rechner (siehe Kapitel 5.4.4 und 5.4.5). Somit soll mit diesem Funktionstest die Erfüllung der Anforderungen FA-04 bis FA-06, der NFA-09 und der SA-04 nachgewiesen werden.

Dazu wurde dem DFG/USB2pro das CVBS der bereits verifizierten Kameraeinheit über Cinch zugeführt. Die Digitalisierungseinheit wurde über ein USB-Kabel mit dem Rechner verbunden. Der genaue Versuchsaufbau ist in Abbildung 34 abgebildet. Nach der korrekten Software-Integration wie in Kapitel 7.2.2 und 7.4 beschrieben, wurde die Digitalisierungseinheit durch den Rechner erkannt und mit Spannung versorgt. Anschließend konnte mit dem herstellereigenen Programm IC Capture 4 ein Videosignal empfangen und dargestellt werden. Nach korrekter Konfiguration des Programms VLC Media Player gemäß der Anleitung in Anhang 5 war auch hier ein Videosignal darstellbar. Dieses ist in Abbildung 35 dargestellt.

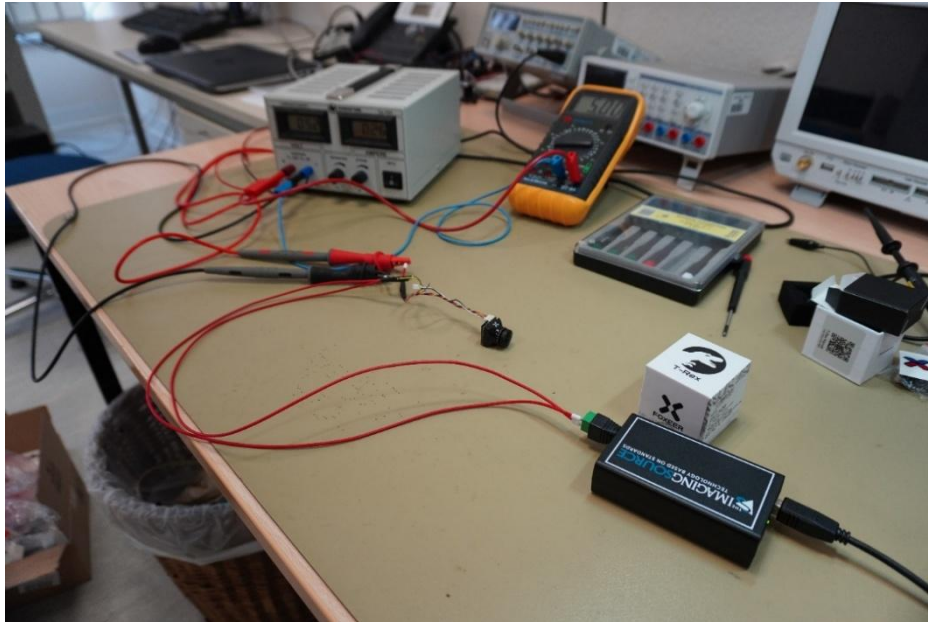


Abbildung 34 Versuchsaufbau zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Digitalisierungseinheit DFG/USB2pro

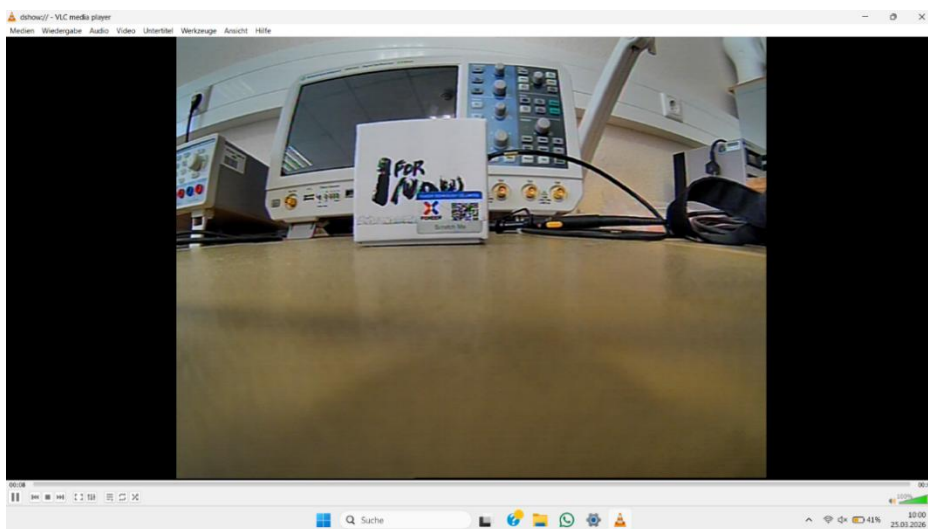


Abbildung 35 Wiedergabe des digitalisierten CVBS unter Verwendung des Programms VLC Media Players

Somit ist nachgewiesen, dass die Digitalisierungseinheit das analoge Videosignal digitalisieren kann (FA-04), dieses über die standardisierte Schnittstelle in Form von USB übertragen und wiedergeben kann (FA-05, FA-06, NFA-09 und SA-04). Daraus ergibt sich, dass der DFG/USB2pro für eine Verwendung in dem Referenzaufbau geeignet ist.

8.1.4 Digitalisierungseinheit Variante B

Wie in Kapitel 7.2.3 beschrieben, haben der Auftraggeber und der Entwickler gemeinsam entschieden, diese Variante im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht weiter zu verfolgen. Somit entfällt die Verifikation der Digitalisierungseinheit bestehend aus dem EVAL-ADV7282AMEBZ von Analog Devices und dem Raspberry Pi Zero 2W.

8.1.5 Spannungsversorgung

Um eine korrekte Spannungsversorgung zu gewährleisten, soll nachgewiesen werden, dass die eingesetzte Versorgung über USB und der Spannungsregler XL0619 von JOY-IT gemäß dem Detailentwurf funktionieren.

Zuerst wurde die Spannungsversorgung über USB überprüft. Dazu wurde der USB 2.0 Typ A Stecker an eine Powerbank angeschlossen und die Adern des Kabels mit dem Digitalmultimeter verbunden. Dieser Aufbau ist in Abbildung 36 dargestellt.

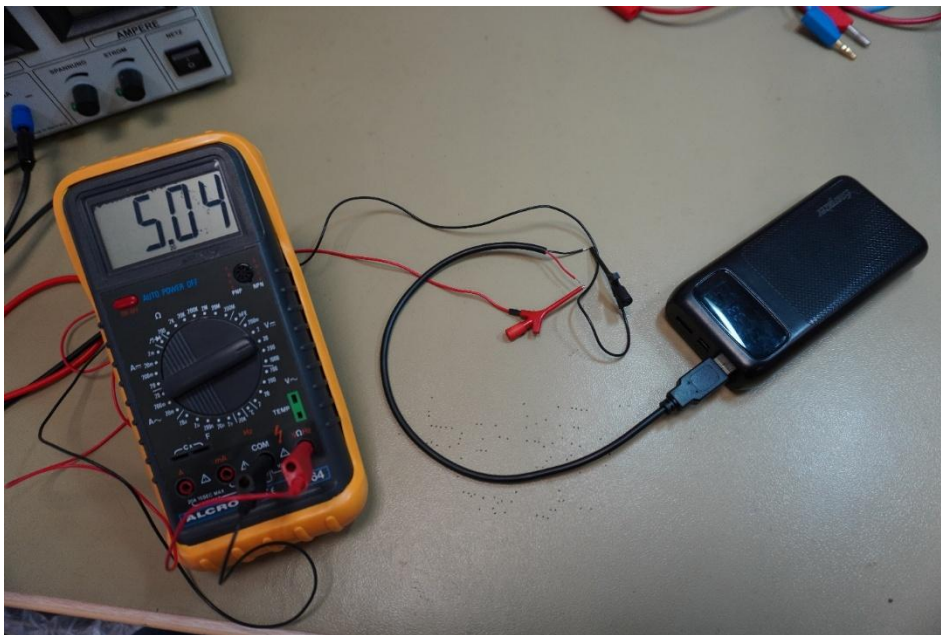


Abbildung 36 Versuchsaufbau zur Messung der USB-Spannungsversorgung

Die gemessene Spannung beträgt 5 Volt und entspricht somit dem USB-Standard, wie in Kapitel 2.5.6 beschrieben. Diese Schaltung erfüllt somit die Anforderung NFA-07 und ist somit für die Spannungsversorgung für das System auf der Senderseite geeignet.

Auf der Empfängerseite muss die Spannungsversorgung nur für dem Empfänger RC832 Mini realisiert werden, da der DFG/USB2pro über den PC versorgt wird, an welchen das Videosignal weitergeleitet wird. Die 12 Volt Spannungsversorgung wird mithilfe des

Spannungsregler XL6019 aus einer 5 Volt USB Spannungsversorgung bereitgestellt. Um dies zu überprüfen, wurde der USB 2.0 Typ A Stecker, welcher über ein zweiadriges Kabel mit dem Spannungsregler XL6019 verbunden ist, an eine Powerbank angeschlossen. Die Ausgangskontakte des Spannungsreglers sind mit dem Digitalmultimeter verbunden. Dieser Aufbau ist in Abbildung 37 dargestellt.

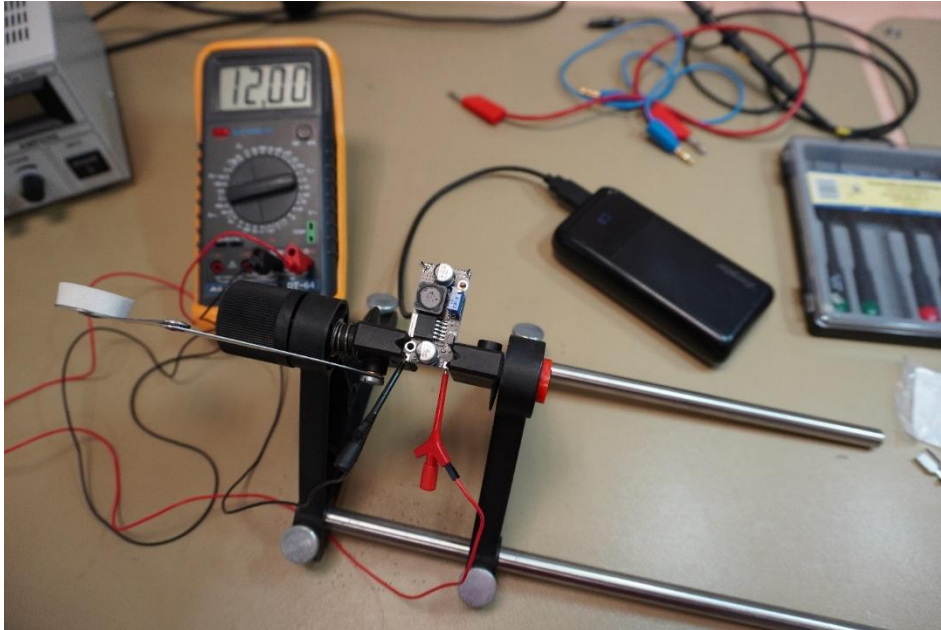


Abbildung 37 Versuchsaufbau zur Messung der 12V-Spannungsversorgung

Die gemessene Spannung am Ausgang des Spannungsreglers beträgt genau 12 Volt. Sie entspricht somit genau der benötigten Versorgungsspannung für den Funkempfänger RC832 Mini. Somit ist diese Schaltung für die Spannungsversorgung für das System geeignet.

8.1.6 Verarbeitung eines CVBS

Die Ergebnisse der vorherigen Funktionstests zeigen, dass die Kameraeinheit ein normgerechtes CVBS bereitstellt, welches als Ausgangssignal für die weitere Verarbeitung dient. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass die Funkübertragungsstrecke in der Lage ist, dieses analoge Videosignal zu modulieren, drahtlos zu übertragen und am VRX wieder als CVBS bereitzustellen. Weiterhin wurde im Rahmen der Untersuchung der Digitalisierungseinheit in Variante A gezeigt, dass das vom bereitgestellte CVBS auf der Empfängerseite erfolgreich in einen digitalen Videodatenstrom überführt und auf einem Rechner dargestellt werden kann. Durch die erfolgreiche Durchführung der Einzelfunktionstests aller

relevanten Komponenten kann somit nachgewiesen werden, dass das CVBS entlang der gesamten Signalkette verarbeitet werden kann. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird die Systemanforderung SA-01 als erfüllt bewertet.

8.2 Analyse der Systemauslegung

Im Rahmen der Analyse der Systemauslegung wird überprüft, inwieweit die im Vorfeld definierten Anforderungen NFA-05, NFA-08 und SA-02 hinsichtlich der Realisierbarkeit, der mechanischen Integration sowie der Einhaltung regulatorischer Vorgaben erfüllt werden konnten. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage der im Detailentwurf sowie der Implementierung getroffenen Entscheidungen.

Eine zentrale Anforderung besteht darin, dass das System unter Verwendung marktverfügbarer und dokumentierter elektronischer Bauelemente realisierbar sein soll (NFA-05). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde diese Anforderung weitestgehend berücksichtigt, indem ausschließlich kommerziell verfügbare Komponenten eingesetzt wurden. Allerdings zeigte sich, dass nicht zu allen verwendeten Bauelementen eine vollständig umfassende und detaillierte Dokumentation verfügbar ist (siehe Anhang 2). Insbesondere bei einzelnen Komponenten wie z.B. dem VRX RC832 Mini sind die bereitgestellten Informationen teilweise eingeschränkt. Aus diesem Grund kann die Anforderung NFA-05 nur als teilweise erfüllt bewertet werden. Die nicht-funktionale Anforderung NFA-08 fordert, dass bei der Systemauslegung darauf zu achten ist, dass alle Komponenten auf der Senderseite in ihren mechanischen Dimensionen so gewählt werden, dass eine spätere Integration in eine Datenbrille möglich ist. Diese Anforderung wurde im Rahmen der Arbeit vollständig umgesetzt. Sowohl die Kameraeinheit als auch der Videosender und die eingesetzte Antenne wurden hinsichtlich ihrer Abmessungen so ausgewählt, dass eine Integration in eine kompakte Bauform, wie beispielsweise eine Datenbrille, grundsätzlich möglich ist. Die mechanische Auslegung der Senderkomponenten erfüllt damit die gestellten Anforderungen vollständig. Die Systemanforderung SA-02 fordert, dass das System eine drahtlose Übertragung unter Verwendung zulässiger Frequenzbereiche ermöglicht. Im Rahmen der Auslegung und Umsetzung des Systems wurde darauf geachtet, die Vorgaben des Frequenznutzungsplans der BNetzA einzuhalten. Insbesondere wurden geeignete Frequenzbereiche gewählt, die für die vorgesehene Anwendung unter Einhaltung der EIRP zulässig sind. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte kann die Anforderung SA-02 als erfüllt angesehen werden.

8.3 Analyse der Implementierung

Im Rahmen der Analyse der Implementierung wird bewertet, inwieweit die im Vorfeld definierten Anforderungen hinsichtlich des Realisierungsaufwands, der Energieversorgung sowie der praktischen Umsetzbarkeit des Systems erfüllt werden konnten. Die Bewertung basiert auf den im Kapitel 7 der Implementierung beschriebenen Maßnahmen sowie den dabei gewonnenen Erkenntnissen.

Die nicht-funktionale Anforderung NFA-06 fordert, dass das System als Referenzaufbau mit vertretbarem Aufwand implementierbar sein soll. Diese Anforderung wurde im Rahmen der Arbeit vollständig erfüllt. Der Aufbau des Systems konnte mit vergleichsweise geringem technischen und zeitlichen Aufwand realisiert werden, da überwiegend auf marktverfügbare und bereits integrierte Komponenten zurückgegriffen wurde. Der erforderliche Implementierungsaufwand beschränkte sich im Wesentlichen auf die Herstellung einzelner elektrischer Verbindungen, die Konfiguration der Komponenten, die Einstellung der Kameraeinheit, des VTX, des VRX und des Spannungswandlers sowie die Installation der notwendigen Treiber und Anwendungssoftware für die Digitalisierungseinheit. Insgesamt ist der Realisierungsaufwand daher als gering einzustufen. Die nicht-funktionale Anforderung NFA-07 fordert, dass die Stromversorgung der Senderseite mit einer Versorgungsspannung von 5 V erfolgen soll. Diese Anforderung wurde vollständig umgesetzt. Sowohl die Kameraeinheit als auch der VTX werden im realisierten Referenzaufbau über eine Powerbank mit einer Versorgungsspannung von 5 V betrieben. Damit ist sichergestellt, dass die elektrische Integration in ein kompaktes System, wie eine Datenbrille mit entsprechendem Versorgungsnetz, grundsätzlich möglich ist. Die Systemanforderung SA-05 fordert, dass das System mit verfügbaren elektronischen Komponenten als funktionsfähiger Laboraufbau realisierbar sein muss. Diese Anforderung wurde ebenfalls vollständig erfüllt. Der Aufbau konnte erfolgreich in Betrieb genommen werden und ermöglicht die drahtlose Übertragung eines analogen Videosignals entsprechend der definierten Zielsetzung. Die verwendeten Komponenten sind kommerziell verfügbar und konnten ohne besondere Anpassungen zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem integriert werden.

8.4 Feldversuche

Ziel der Feldversuche sind die experimentelle Untersuchung des Übertragungsverhaltens des realisierten Systems unter realitätsnahen Einsatzbedingungen. Zu diesem Zweck werden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet:

- unter Freisichtbedingungen (LOS)
- innerhalb eines Gebäudes

Die während der Versuche gewonnenen Daten dienen als Grundlage für die im nachfolgenden Kapitel 8.4.1 durchgeführte Analyse des Übertragungsverhaltens.

8.4.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Für die Durchführung der Feldversuche wurde der im Rahmen der Implementierung aufgebaute Referenzaufbau verwendet. Die Empfängerseite wurde dabei stationär an einem definierten Standort positioniert und über die Digitalisierungseinheit mit einem Rechner verbunden, sodass das empfangene Videosignal kontinuierlich aufgezeichnet werden konnte.

Die Senderseite wurde mobil betrieben und während des Versuchs von der Empfängerseite entfernt. Die Bewegung erfolgte entlang einer geraden Strecke, wobei eine möglichst gleichmäßige Entfernungserhöhung angestrebt wurde. Während der gesamten Versuchsdauer wurde das empfangene Videosignal aufgezeichnet, um die Veränderung der Bildqualität in Abhängigkeit der Entfernung sowie den Zeitpunkt eines Verbindungsabbruchs nachvollziehen zu können. Der Versuch wurde jeweils so lange durchgeführt, bis keine stabile Signalübertragung mehr möglich war. Die Systemkonfiguration während der Versuche entsprach den in Kapitel 7.3 beschriebenen Einstellungen. Dies betrifft insbesondere die gewählten Übertragungsparameter wie das verwendete Frequenzband, den eingestellten Kanal sowie die Sendeleistung des VTX und die korrespondierenden Einstellungen des VRX. Zur Aufzeichnung des empfangenen Videosignals wurde die Software IC Capture 4 eingesetzt. Die aufgezeichneten Videodaten sowie detaillierte Angaben zu den jeweiligen Versuchsbedingungen, einschließlich der genauen Standorte und Umgebungsbedingungen, sind im Anhang 7 dieser Arbeit dokumentiert.

8.4.2 Freisichtbedingungen (LOS)

Der Feldversuch unter Freisichtbedingungen wurde durchgeführt, um das Übertragungsverhalten des Systems unter möglichst günstigen Ausbreitungsbedingungen zu untersuchen. Ziel war es, eine praxisnahe Abschätzung der maximal erreichbaren Reichweite sowie eine qualitative Bewertung der Signalstabilität zu ermöglichen.

Als Versuchsstandort wurde nach Absprache eine teils private Verbindungsstraße für Agrarnutzung und Windkrafteinspeiser auf einem Feld gewählt. Dieser Standort bietet aufgrund seiner baulichen Eigenschaften besonders geeignete Testbedingungen. Die Straße zeichnet sich durch eine große Länge, einen weitgehend geradlinigen Verlauf sowie geringe Bodenunebenheiten aus, wodurch eine nahezu ungestörte Sichtverbindung zwischen Sender- und Empfängerseite ermöglicht wird. Darüber hinaus handelt es sich um einen verkehrsberuhigten Bereich, sodass der Versuch unter sicheren Bedingungen und mit einem PKW durchgeführt werden konnte.

Die Empfängerseite wurde für den Versuch stationär in einer Höhe von etwa einem Meter über dem Boden positioniert. Diese erhöhte Positionierung dient der Reduzierung von bodennahen Abschattungen und verbessert die Empfangsbedingungen. Diese Positionierung ist in Abbildung 38 zu sehen. Die Digitalisierungseinheit wurde mit einem Laptop verbunden, auf dem die Aufnahmesoftware IC Capture 4 installiert war. Über diese Software wurde das empfangene Videosignal während des gesamten Versuchs aufgezeichnet.



Abbildung 38 Positionierung der Empfängerseite nach Variante A bei dem Feldversuch unter Freisichtbedingungen



Abbildung 39 Positionierung der Senderseite bei dem Feldversuch unter Freisichtbedingungen

Die Senderseite wurde auf der Heckscheibe eines PKW in einer Höhe von circa einem Meter über dem Boden positioniert und gesichert. Die Ausrichtung war in Richtung der Empfängerseite und ist in Abbildung 39 zu dargestellt. Dadurch wurde sichergestellt, dass eine Verschattung durch den PKW die Funkverbindung nicht stört.

Zu Beginn des Versuchs wurde die Videoaufzeichnung gestartet. Anschließend wurde die Entfernung zwischen Sender- und Empfängerseite durch eine gleichmäßige Bewegung des Fahrzeugs entlang der Straße kontinuierlich vergrößert. Dabei wurde auf eine möglichst konstante Geschwindigkeit geachtet, um eine gleichmäßige Veränderung der Übertragungsbedingungen zu gewährleisten. Der Versuch konnte bis zu einer Entfernung von etwa 540 m durchgeführt werden. Bis zu diesem Punkt zeigte das empfangene Videosignal eine weitgehend stabile Übertragungsqualität ohne augenscheinliche, signifikante Störungen oder Bildartefakte. Anschließend trat ab einer Entfernung von 550 m ein vollständig ver-rauschtes Videosignals ein, wodurch die maximale Reichweite unter den gegebenen Bedingungen bestimmt werden konnte.

Die während des Versuchs aufgezeichnete Videodatei ist im Anhang 7 enthalten. Der entsprechende Dateipfad sowie weiterführende Informationen zu dem Versuch sind ebenfalls im Anhang 7 dokumentiert.

8.4.3 Innerhalb eines Gebäudes

Der zweite Feldversuch wurde innerhalb eines Gebäudes durchgeführt, um das Übertragungsverhalten des Systems unter erschwerten Ausbreitungsbedingungen zu untersuchen. Ziel war es, die Auswirkungen von baulichen Strukturen wie Wänden, Decken und Einrichtungsgegenständen sowie Störeinflüsse durch Funkanwendungen wie bspw. WLAN auf die Signalübertragung sowie die erreichbare Reichweite zu erfassen.

Als Versuchsstandort wurde das Hauptgebäude der WHZ am Kornmarkt 1 in Zwickau, der Paul-Kirchhoff-Bau (PKB), gewählt. Die Messung wurde in der zweiten Etage durchgeführt. Dieser Standort bietet aufgrund der vorhandenen Gebäudestruktur realistische Bedingungen für die Untersuchung von Funkübertragungen in Innenräumen, da zahlreiche Hindernisse und Reflexionsflächen vorhanden sind.

Die Empfängerseite wurde stationär im südlichen Treppenhaus positioniert. Hierzu wurde ein Tisch verwendet, auf dem die Empfangseinheit in einer Höhe von etwa 80 bis 90 cm über dem Boden platziert wurde. Die Aufnahme des Videosignals erfolgte adäquat zum Freifeldversuch mit demselben Laptop. Die Senderseite wurde in diesem Versuch auf einer Höhe von etwa einem Meter positioniert und von einer Person getragen. Dadurch ergibt sich im Vergleich zum Freifeldversuch eine verstärkte Bewegung der Kamera, was sich in Form von Verwacklungen im aufgezeichneten Bild bemerkbar macht.

Nach Beginn der Videoaufzeichnung entfernte sich die Person mit der Senderseite entlang des Flurs von der Empfängerseite. Auf der Wegstrecke des Flures wurden 3 Türen durchquert. Die Entfernung zwischen Sender- und Empfängerseite wurde dabei kontinuierlich erhöht, bis die Signalübertragung nicht mehr möglich war. Die maximale erreichbare Entfernung lag in diesem Versuch bei etwa 70 m. Dies entspricht der Strecke vom Treppenhaus, in dem sich die Empfängerseite befindet, bis zum Abzweig des Flurs in Richtung der Seminarräume des Gregorius-Agricola-Baus (GAB). Im Vergleich zum Feldversuch unter Freisichtbedingungen zeigte das empfangene Videosignal deutlich stärkere Störungen. Insbesondere traten vermehrt Bildartefakte und Signalbeeinträchtigungen ab einer Entfernung von circa 40 m auf. Diese Störungen sind auf die Einflüsse der baulichen Umgebung wie z.B. die Türen zurückzuführen sind. Trotz dieser Störungen blieb die Bildinformation jedoch grundsätzlich erhalten, sodass die dargestellte Umgebung weiterhin erkennbar war.

Die während des Versuchs aufgezeichnete Videodatei ist im Anhang 7 enthalten. Der entsprechende Dateipfad sowie weiterführende Informationen zu dem Versuch sind ebenfalls im Anhang 7 dokumentiert.

8.5 Analyse des Übertragungsverhaltens

Im Rahmen der Analyse des Übertragungsverhaltens wird untersucht, inwieweit das realisierte System die definierten Anforderungen hinsichtlich Latenz, Reichweite, Stabilität sowie Bildqualität erfüllt. Die Bewertung basiert auf den im Rahmen der Feldversuche gewonnenen Beobachtungen und den dabei aufgezeichneten Videodaten.

Die nicht-funktionale Anforderung NFA-01 fordert, dass die Übertragung mit einer möglichst geringen Verzögerung erfolgen soll, sodass eine quasi-echtzeitfähige Darstellung gewährleistet ist. In beiden durchgeführten Feldversuchen konnte beobachtet werden, dass Veränderungen im aufgenommenen Bild, beispielsweise durch Bewegung der Kamera, ohne eine wahrnehmbare Verzögerung auf dem angeschlossenen Rechner dargestellt wurden. Eine signifikante Latenz war visuell nicht feststellbar. Somit kann die Anforderung NFA-01 als erfüllt bewertet werden. Die nicht-funktionale Anforderung NFA-02 fordert, dass eine drahtlose Übertragung über eine definierte Mindestreichweite ermöglicht werden soll. In Kapitel 5.5.2 wurde diese Reichweite auf mindestens 200 m unter Freisichtbedingungen (LOS) sowie 40 m innerhalb eines Gebäudes festgelegt. Im Rahmen des Feldversuchs unter Freisichtbedingungen konnte eine maximale Reichweite von etwa 540 m erreicht werden,

womit die geforderte Mindestreichweite deutlich überschritten wird. Im Innenraumversuch konnte eine Reichweite von etwa 70 m erzielt werden. Die Anforderung NFA-02 wird somit ebenfalls als erfüllt angesehen. Die nicht-funktionale Anforderung NFA-03 fordert eine stabile Übertragung ohne signifikante Unterbrechungen oder Bildausfälle. Im Feldversuch unter Freisichtbedingungen zeigte sich das Videosignal bis kurz vor Erreichen der maximalen Reichweite als stabil und störungsfrei. Erste Bildartefakte traten erst in einem Bereich von etwa 20 m vor der maximalen Reichweite auf. Zusätzlich wurden etwa 10 m vor Erreichen der maximalen Reichweite erste Verluste in der Chrominanz festgestellt. Ein vollständiger Signalabbruch erfolgte erst beim Erreichen der maximalen Distanz. Im Feldversuch innerhalb des Gebäudes traten bereits ab einer Entfernung von etwa 40 m erste Bildstörungen auf. Diese äußerten sich in Form von Artefakten und Signalbeeinträchtigungen, führten jedoch nicht zu vollständigen Bildausfällen oder signifikanten Unterbrechungen der Übertragung. Somit konnte auch unter den Bedingungen innerhalb eines Gebäudes eine durchgehende Signalübertragung gewährleistet werden. Die Anforderung NFA-03 wird daher insgesamt als erfüllt bewertet. Die nicht-funktionale Anforderung NFA-04 fordert, dass das übertragene Videosignal möglichst störarm und artefaktfrei dargestellt werden soll. Für den Feldversuch unter Freisichtbedingungen kann diese Anforderung uneingeschränkt als erfüllt angesehen werden, da bis kurz vor Erreichen der maximalen Reichweite keine relevanten Störungen oder Artefakte auftraten. Im Innenraumversuch zeigt sich jedoch ein differenzierteres Bild. Bis zu einer Entfernung von etwa 40 m konnte das Videosignal weitgehend störungsfrei dargestellt werden. Mit zunehmender Entfernung traten jedoch verstärkt Bildartefakte und auch Störungen in der Chrominanz auf. Im Entfernungsbereich zwischen etwa 40 m und 60 m war das Bildsignal deutlich beeinträchtigt, blieb jedoch grundsätzlich interpretierbar, sodass die dargestellte Umgebung weiterhin erkennbar war. Aufgrund dieser Einschränkungen wird die Anforderung NFA-04 insgesamt als teilweise erfüllt bewertet. Die Systemanforderung SA-03 fordert, dass das System eine stabile Videoübertragung über eine definierte Distanz gewährleisten soll. Diese Anforderung ergibt sich im Wesentlichen aus dem Zusammenspiel der Anforderungen NFA-02, NFA-03 und NFA-04. Da sowohl die geforderten Mindestreichweiten erreicht als auch eine stabile Übertragung ohne vollständige Bildausfälle gewährleistet werden konnte, wird die Anforderung SA-03 als erfüllt bewertet.

Zusammenfassend zeigt die Analyse des Übertragungsverhaltens, dass die wesentlichen Anforderungen an Reichweite, Stabilität und Latenz erfüllt werden konnten.

Einschränkungen bestehen lediglich im Bereich der Bildqualität bei Übertragungen im Innenbereich, wodurch die Anforderung an eine vollständig störungsfreie Darstellung nur teilweise erfüllt werden kann.

8.5.1 Vergleich der theoretischen und gemessenen Maximalreichweite

Im Rahmen des Detailentwurfs wurde im Kapitel 6.7 auf Basis der Freiraumdämpfung eine theoretisch erreichbare maximale Reichweite von etwa 1,4 km bestimmt. Diese Berechnung basierte auf den zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Annahmen bezüglich der Sendeleistung, der Antennengewinne sowie der Empfängerempfindlichkeit.

Im praktischen Feldversuch unter Freisichtbedingungen konnte diese theoretische Reichweite jedoch nicht erreicht werden. Stattdessen wurde eine maximale Reichweite von etwa 540 m erzielt, bei der es zu einem vollständigen Abbruch des Videosignals kam. Die Abweichung zwischen theoretischer und praktischer Reichweite lässt sich im Wesentlichen auf die im Systementwurf getroffenen Annahmen zur Empfängerempfindlichkeit zurückführen. Zum Zeitpunkt des Detailentwurfs lag kein Datenblatt für den im VRX eingesetzten IC vor, sodass von einer höheren Empfindlichkeit von - 95 dB ausgegangen wurde. Nach Öffnen des Empfängergehäuses konnte der verbaute IC identifiziert werden. Zum Einsatz kommt ein RTC6715 mit einer Empfindlichkeit L_E von - 85 dB [98].

$$d = 10^{\left(\frac{13,99 \text{ dBm} - 1,585 \text{ dB} + 1,6 \text{ dBi} + 1,6 \text{ dBi} - (-85 \text{ dB})}{20} - \lg \left(\frac{4\pi}{2,99711 \cdot 10^9 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot 5,733 \cdot 10^9 \text{ Hz} \right) \right)}$$

$$d = 446,03 \text{ m}$$

Wird diese zusammen mit der realisierten Leitungsdämpfung $L_{K,real}$ von 1,585 dB aus Kapitel 7.1 und der gewählten Frequenz von 5,733 GHz in die Formel (9) der maximal möglichen Reichweite unter Berücksichtigung der FSPL aus Kapitel 2.2.2 eingesetzt, ergibt sich eine theoretische Reichweite d von etwa 450 m.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass diese theoretisch berechnete Reichweite im praktischen Versuch um mehr als 100 m überschritten wurde. Für diese Abweichung kommen mehrere Ursachen in Betracht. Eine mögliche Erklärung ist, dass der eingesetzte VTX eine höhere Sendeleistung als die angenommenen 25 mW aufweist. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Antennen einen höheren Gewinn besitzen als in den technischen Angaben spezifiziert. Alternativ könnte auch die effektive Empfindlichkeit des VRX höher sein als die im Datenblatt des Chips angegebene Empfindlichkeit.

Eine plausible Erklärung für die beobachtete Reichweitenerhöhung stellt eine mögliche Vorverstärkung im VRX dar. Bereits eine geringe Verstärkung des empfangenen Signals kann einen signifikanten Einfluss auf die erreichbare Reichweite haben. Unter der vereinfachten Annahme, dass das empfangene Signal durch eine Vorverstärkerstufe um den Faktor zwei verstärkt (entspricht einer Empfindlichkeit von -88 dB, da Verdopplung 3 dB sind) wird, ergibt sich bereits eine Erhöhung der maximal möglichen Reichweite in der Größenordnung von etwa 200 m.

$$d = 10^{\left(\frac{13,99 \text{ dBm} - 1,585 \text{ dB} + 1,6 \text{ dBi} + 1,6 \text{ dBi} - (-88 \text{ dB})}{20} - \lg \left(\frac{4\pi}{2,99711 \cdot 10^9 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot 5,733 \cdot 10^9 \text{ Hz} \right) \right)}$$

$$d = 630,03 \text{ m}$$

Diese theoretische Reichweite d von circa 630 m entspricht der Reichweite unter Idealbedingungen. In der Praxis sind allerdings gemäß den im Kapitel 2.2.2 erwähnten Ausbreitungsmechanismen von Wellen im GHz-Bereich bereits einzelne Bäume und Unebenheiten ausreichend, um die Übertragung zu beeinflussen. Daher liegt die realisierbare Reichweite immer unterhalb der theoretischen Reichweite.

Eine eindeutige Zuordnung dieser Abweichung zu einer der genannten Ursachen ist im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit nicht möglich, da entsprechende Messungen und weiterführende Untersuchungen in dem zeitlichen Rahmen nicht eingeplant wurden und dementsprechend nicht durchgeführt werden konnten.

8.6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Kapitels 8 wurde das entwickelte System hinsichtlich der im Vorfeld definierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen untersucht. Die Bewertung erfolgte auf Basis der durchgeführten Analysen sowie der praktischen Versuche, insbesondere der Funktionstests und der Feldversuche.

Zur übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse wird im Folgenden eine zusammenfassende Bewertung aller Anforderungen vorgenommen. Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 20 dargestellt. Hierbei wird ein vereinfachtes Bewertungssystem verwendet, welches den Erfüllungsgrad der einzelnen Anforderungen kennzeichnet.

Identifikation	Anforderung (Kurzbeschreibung)	Bewertung
FA-01	Erfassung eines analogen Videosignals	+
FA-02	Drahtlose Übertragung des Videosignals	+
FA-03	Empfang und Rekonstruktion des Videosignals	+
FA-04	Digitalisierung des analogen Videosignals	+
FA-05	Übertragung des digitalisierten Signals an einen Rechner	+
FA-06	Erkennung als standartkonformes Videogerät am Rechner	0
NFA-01	Geringe Latenz/Quasi-Echtzeitfähigkeit	+
NFA-02	Mindestreichweite (200m LOS/40m Innenbereich)	+
NFA-03	Stabile Übertragung ohne Bildausfälle	+
NFA-04	Störrarme und Artefaktfreie Übertragung	0
NFA-05	Verwendung marktverfügbarer und dokumentierter Komponenten	0
NFA-06	Implementierung mit vertretbarem Aufwand	+
NFA-07	5 V Spannungsversorgung Senderseite	+
NFA-08	Mechanische Integrationsfähigkeit der Senderseite	+
SA-01	Verarbeitung eines CVBS	+
Sa-02	Nutzung zulässiger Frequenzbereiche	+
SA-03	Stabile Videoübertragung über definierte Distanz	+
SA-04	Bereitstellung einer digitalen Ausgabe des Videosignals	+
SA-05	Funktionsfähiger Laboraufbau mit verfügbaren Komponenten	+

Tabelle 20 Zusammenfassende Bewertung der Anforderungen (+: Anforderung vollständig erfüllt; 0: Anforderung teilweise erfüllt; -: Anforderung nicht erfüllt)

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das entwickelte System die gestellten Anforderungen in weiten Teilen erfüllt. Dies betreffen insbesondere die Verarbeitung, Übertragung, Digitalisierung und Bereitstellung des Videosignals. Teilweise Einschränkungen bestehen lediglich hinsichtlich der standardkonformen Geräteerkennung sowie der störungsarmen Bilddarstellung unter erschwerten Übertragungsbedingungen.

9 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit konnte das Projekt zur Konzeption und Realisierung eines Systems zur analogen Videosignalübertragung per Funk umgesetzt werden, wobei ein funktionsfähiger Referenzaufbau realisiert, experimentell untersucht und hinsichtlich der definierten Anforderungen bewertet werden konnte.

Die in der Einleitung formulierten Teilziele wurden dabei erreicht. Die Durchführung einer fundierten Analyse der grundlegenden Anforderungen an eine analoge Videoübertragung, wurde durch die strukturierte Herleitung funktionaler, nicht-funktionaler und systemischer Anforderungen in Kapitel 4 erfüllt. Der Entwurf und die systematische Auswahl und Bewertung geeigneter Komponenten für die Sender- und Empfängerseite, konnte durch die Auswahl marktverfügbarer und technisch geeigneter Bauelemente erfolgreich in den Kapiteln 5 und 6 umgesetzt werden. Die Realisierung eines funktionsfähigen Referenzaufbaus wurde durch die Implementierung des Gesamtsystems in Kapitel 7 erzielt. Mit der Durchführung experimenteller Untersuchungen sowie der Bewertung des Aufbaus unter realitätsnahen Betriebsbedingungen in Kapitel 8 wurde auch die letzte Zielstellung erfüllt.

Im Rahmen der Implementierung zeigte sich, dass die im Detailentwurf betrachtete Variante B zur Digitalisierung des Videosignals auf der Empfängerseite nicht realisiert werden konnte. Ursache hierfür war die Schwierigkeit bei der Inbetriebnahme des verwendeten Entwicklungsboards, dass die zur Konfiguration notwendige USB-Schnittstelle nicht funktionierte oder nicht erkannt wurde. Innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens der Diplomarbeit konnte trotz Kontaktaufnahme zudem technischen Support keine Lösung gefunden werden, sodass diese Variante im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet wurde. Ein weiterer relevanter Aspekt ergibt sich aus dem Vergleich zwischen der theoretisch bestimmten und der praktisch erreichten Reichweite des Systems in Kapitel 8.5.1. Während auf Basis der FSPL unter Berücksichtigung der realen Empfängerempfindlichkeit eine maximale Reichweite von etwa 450 m zu erwarten gewesen wäre, konnte im Feldversuch unter Freisichtbedingungen (LOS) eine Reichweite von etwa 540 m erzielt werden. Diese Abweichung deutet auf Abweichungen in der Funkstrecke im realen System hin. Eine Aufklärung dieser Auffälligkeit war im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgrund des zeitlichen Umfangs in dieser Diplomarbeit jedoch nicht möglich.

Für den weiteren Verlauf des Projektes ergeben sich aus dieser Diplomarbeit konkrete Ansatzpunkte zum weiteren Vorgehen. Ein zentraler Aspekt besteht in der erfolgreichen Realisierung der im Detailentwurf betrachteten Variante B der Digitalisierungseinheit mittels Video-Decoder und Einplatinencomputer. Nach Klärung der aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme des Entwicklungsboards sollte diese Variante in die praktische Umsetzung überführt werden. Dadurch kann eine erweiterte Funktionalität sowie eine höhere Flexibilität bei der Verarbeitung des Videosignals erreicht werden.

Darüber hinaus besteht weiterer Untersuchungsbedarf hinsichtlich der im Rahmen der Feldversuche beobachteten Abweichung zwischen theoretisch berechneter und tatsächlich erreichter Reichweite. Es sollte gezielt analysiert werden, an welcher Stelle innerhalb der Funkstrecke diese Abweichung entsteht. Hierzu sind insbesondere detaillierte Messungen der Sendeleistung, der Antennengewinne sowie der effektiven Empfängerempfindlichkeit erforderlich, um die Ursache der erhöhten Reichweite eindeutig identifizieren zu können. Nach erfolgreicher Umsetzung der Variante B sowie der Klärung der genannten Abweichungen kann ein systematischer Vergleich zwischen den verschiedenen Realisierungsvarianten durchgeführt werden. Ein weiterer Ansatz besteht in der detaillierten Untersuchung der in den verwendeten Komponenten eingesetzten Bauelemente wie z.B. ICs. Durch eine gezielte Analyse der verbauten ICs sowie deren Funktionsweise und Schnittstellen kann ein tieferes Verständnis der internen Signalverarbeitung gewonnen werden. Auf Basis dieser Ergebnisse ergibt sich die Möglichkeit einer weiterführenden Eigenentwicklung des Gesamtsystems. Ziel einer solchen Eigenentwicklung ist es, eine kompaktere und stärker integrierte Systemlösung zu realisieren, die eine bessere Anpassung an den vorgesehenen Einsatzzweck, beispielsweise die Integration in eine Datenbrille, ermöglicht. Gleichzeitig würde eine Eigenentwicklung den Vorteil bieten, eine größere Unabhängigkeit von bestehenden Herstellerlösungen zu erreichen und einen vollständigen Zugriff auf alle relevanten Systemparameter zu gewährleisten.

10 Zusammenfassung

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Konzeption, Realisierung und Analyse eines Referenzaufbaus zur analogen Videoübertragung über eine Funkstrecke zwischen einer Kamera und einem Rechner. Zur Schaffung eines fundierten Verständnisses der technischen und normativen Zusammenhänge werden zunächst die wesentlichen theoretischen Grundlagen zur Erfüllung der Zielstellungen in kompakter Form dargestellt. Zur systematischen Entwicklung des Referenzaufbaus wird ein methodisches Vorgehen in Anlehnung an das V-Modell angewendet, das eine strukturierte Verknüpfung von Anforderungsdefinition, Entwurf, Implementierung und Verifikation gewährleistet. Aufbauend auf den theoretischen Hintergrund erfolgt eine strukturierte Anforderungsanalyse, in der die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an das zu entwickelnde System systematisch erfasst und definiert werden. Anschließend erfolgt der Systementwurf, bei dem eine geeignete Systemarchitektur abgeleitet sowie zentrale Parameter und Komponenten für Sender- und Empfängerseite festgelegt werden. Im anschließenden Detailentwurf werden die einzelnen Subsysteme konkret ausgearbeitet und hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften bewertet. Die Implementierung umfasst die praktische Realisierung des Gesamtsystems, einschließlich der Integration der Hardwarekomponenten, der Konfiguration der Software sowie der mechanischen Ausführung. Dabei werden auftretende Herausforderungen analysiert und entsprechende Lösungsansätze erarbeitet. Im Rahmen der Verifikation wird die Funktionsfähigkeit des Systems durch umfangreiche Tests der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems überprüft. Ergänzend erfolgt eine experimentelle Untersuchung der Funkübertragungsstrecke unter realitätsnahen Bedingungen, um Aussagen über Reichweite und Übertragungsqualität treffen zu können. Die Ergebnisse werden analysiert und mit den zuvor definierten Anforderungen abgeglichen. Die Diplomarbeit zeigt, dass mit aktuellen verfügbaren Komponenten ein funktionsfähiger Referenzaufbau zur analogen Videoübertragung realisiert werden kann. Damit wird eine Grundlage für die spätere Integration eines solchen Systems in eine Datenbrille zur drahtlosen Kommunikation mit einer externen Recheneinheit geschaffen.

Quellenverzeichnis

- [1] 3DPrint.com. "Data glasses by Sinterit and Rigo Herold." Zugriff am: 22. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=yfRED8SoLsE>
- [2] J. Noble, "Helmkamera, HDR, Drohnen: Das ist alles neu im Formel-1-Fernsehen 2022!," *Motorsport-Total.com*, 22. März 2022. Zugriff am: 22. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.motorsport-total.com/formel-1/news/helmkamera-hdr-drohnen-das-ist-alles-neu-im-formel-1-fernsehen-2022-22032204>
- [3] S. Dinger, *Feuerwehrmaske mit Datenbrille ermöglicht Navigation in verrauchten Räumen*. Zwickau, 2019. Zugriff am: 22. März 2026. [Online.] Verfügbar unter: <https://nachrichten.idw-online.de/2019/03/25/feuerwehrmaske-mit-datenbrille-ermoeglicht-navigation-in-verrauchten-raeumen>
- [4] Einfach Genial. "Simson mit Software und Datenbrille reparieren? | Einfach genial | MDR." Zugriff am: 22. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=l1jdVgMfyLk>
- [5] A. Päßler, "Spezifikationen analoger und drahtloser Videoübertragung," Westsächsische Hochschule Zwickau, Zwickau, Nov. 2025.
- [6] L. Krisch, *Fernsehtechnik: Grundlagen, Verfahren, Systeme* (Viewegs Fachbücher der Technik). Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1993.
- [7] K. Beuth, S. Breide, C.-F. Lüders, G. Kurz und R. Hanebuth, *Nachrichtentechnik*, 3. Aufl. (Vogel Fachbuch 7). Würzburg: Vogel Buchverl., 2009. [Online.] Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=3445471>
- [8] R. Mäusl, *Fernsehtechnik: Übertragungsverfahren für Bild, Ton und Daten*, 2. Aufl. (Telekommunikation 8). Heidelberg: Hüthig, 1995.
- [9] K. W. Bernath, *Technik des Fernsehens: Aufnahme, Wiedergabe, Speicherung, Übertragung, Empfang, Meßtechnik, Qualitätskriterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986.
- [10] *WIDE-SCREEN SIGNALLING FOR BROADCASTING: Signalling for wide-screen and other*, ITU-R BT.1119-2, International Telecommunication Union (ITU). [Online.] Verfügbar unter: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1119-2-199802-W%21%21PDF-E.pdf?utm_source=chatgpt.com

- [11] U. Freyer, *Nachrichten-Übertragungstechnik: Grundlagen, Komponenten, Verfahren und Anwendungen der Informations-, Kommunikations- und Medientechnik : mit 495 Bildern sowie zahlreichen Beispielen, Übungen und Testaufgaben*, 7. Aufl. (Lernbücher der Technik). München: Hanser, 2017.
- [12] M. Werner, *Nachrichtentechnik: Eine Einführung für alle Studiengänge ; mit 40 Tabellen*, 6. Aufl. (Aus dem Programm Nachrichtentechnik). Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [13] M. Werner, *Nachrichten-Übertragungstechnik: Analoge und digitale Verfahren mit modernen Anwendungen* (Springer eBook Collection Computer Science & Engineering). Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- [14] Circuit Design GmbH. "Digitale Modulation | HF-Entwicklungsleitfaden | CIRCUIT DESIGN GmbH." Zugriff am: 9. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://circuitdesign.de/design_guide/digital-modulation/
- [15] *Formelsammlung: Formeln, Tabellen, Daten; Mathematik, Physik, Astronomie, Chemie, Biologie, Informatik; [bis zum Abitur; mit CD-ROM und Internetportal*, 2. Aufl. Berlin, Mannheim: Duden Paetec Schulbuchverl., 2014.
- [16] C. Wolff. "Quasioptische Sicht - Radar Basics." Zugriff am: 2. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.radartutorial.eu/18.explanations/ex04.de.html>
- [17] C. Wolff. "Polarisation von Antennen - Radar Basics." Zugriff am: 9. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Polarisation.de.html>
- [18] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), *Frequenzplan*, 2022. Zugriff am: 9. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/20210114_frequenzplan.pdf
- [19] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), *Verordnung zum Gesetz über den Amateurfunk: AFuV*, 2005. Zugriff am: 9. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/afuv_2005/AFuV.pdf
- [20] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), *Gesetz über den Amateurfunk: AFuG*, 28.06.21997. Zugriff am: 9. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/afug_1997/AFuG_1997.pdf

- [21] D. J. Katz und R. Gentile, *Embedded media processing* (Embedded technology series). Burlington, MA: Elsevier/Newnes, 2005. Zugriff am: 11. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750679121>
- [22] K.-D. Kammeyer und K. Kroschel, *Digitale Signalverarbeitung: Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen ; mit 33 Tabellen*, 6. Aufl. (Lehrbuch Elektrotechnik). Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner, 2006.
- [23] M. Werner, *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB: Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen*, 3. Aufl. (Springer eBook Collection Computer Science & Engineering). Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- [24] D. Stotz, *Computergestützte Audio- und Videotechnik: Multimediatechnik in der Anwendung*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5795926>
- [25] B. Jähne, *Digitale Bildverarbeitung: Und Bildgewinnung*, 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-3155549>
- [26] E. Hasche und P. Ingwer, *Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion: Theorie und Praxis für Film, Video und Fernsehen*, 1. Aufl. (X.media.press). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1572990>
- [27] Trius Vertrieb GmbH & Co KG. "Was ist Chroma Subsampling?" Zugriff am: 12. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.trius-audio.de/theoretisches-zur-av-technik/was-ist-chroma-subsampling.html>
- [28] LC Design. "MIPI, MIPI-Bridge, DSI." Zugriff am: 13. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://lc-design.de/mipi-mipi-bridge-dsi/>
- [29] Ibsen Photonics. "Was ist MIPI?" Zugriff am: 13. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://ibsen.com/de/ressourcen/detektor-ressourcen/mipi/>
- [30] P. Kumar, "Was ist eine MIPI-Kamera? Wie funktioniert eine MIPI-Kamera?," *e-con Systems*, 04. November 2021. Zugriff am: 13. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.e-consystems.com/blog/camera/de/technologie/was-ist-eine-mipi-kamera-wie-funktioniert-eine-mipi-kamera/>
- [31] P. Kumar. "What is MIPI protocol and standards? How does MIPI Interface Work in Camera?" Zugriff am: 13. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.sinoseen.com/what-is-mipi-protocol-and-standards>

- [32] Arasan Chip Systems Inc. "White Paper: C-PHY vs D-PHY – Choosing the right signal interface for MIPI Camera and Imaging." Zugriff am: 13. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.arasan.com/wp-content/uploads/2016/12/Whitepaper-CPHY-vs-DPHY-April-2016.pdf>
- [33] F.M.H. Studios. "I2C-Bus." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://fmh-studios.de/theorie/informationstechnik/i2c-bus/>
- [34] J. Axelson, *USB complete: The developer's guide* (Complete Guides series). Madison, Wisconsin: Lakeview Research, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=11027461>
- [35] J. Goodrich, "How USB Came to Be," *IEEE Spectrum*, 22. Februar 2022. Zugriff am: 2. Februar 2026. [Online.] Verfügbar: <https://spectrum.ieee.org/how-usb-came-to-be>
- [36] USB Implementers Forum, Inc. "Defined Class Codes." Zugriff am: 2. Februar 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.usb.org/defined-class-codes>
- [37] Fred the Oyster. "USB 2.0 (or 1.1) Standard-A plug, with numbered pins." Zugriff am: 14. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:USB_Type-A.svg
- [38] Fred the Oyster. "USB 2 Standard-B plug, with numbered pins." Zugriff am: 14. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:USB_Type-B.svg
- [39] T. Kolkmann, "USB: Pinbelegung von USB A, B, C & Micro-USB," *Giga*, 03. Januar 2025. Zugriff am: 14. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.giga.de/tipp/usb-pin-belegung-a-b-c-micro/>
- [40] Fred the Oyster. "USB Micro-A connector." Zugriff am: 14. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:USB_Micro-A.svg
- [41] Fred the Oyster. "USB Micro-B connector." Zugriff am: 14. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:USB_Micro-B.svg
- [42] Fred the Oyster. "USB Mini-A connector." Zugriff am: 14. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:USB_Mini-A.svg
- [43] Fred the Oyster. "USB Mini-B connector, with numbered pins." Zugriff am: 14. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:USB_Mini-B.svg
- [44] Elektronik-Kompendium.de. "Stromversorgung mit USB." Zugriff am: 14. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/com/2212141.htm>

- [45] E. Meier, "V-Modelle in Automotive-Projekten," *AUTOMOBIL-ELEKTRONIK*, Februar, S. 36–37, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.all-electronics.de/files/2025/10/15/ael08-01-036.pdf>
- [46] B. Schäppi, *Handbuch Produktentwicklung*. München, Wien: Hanser, 2005.
- [47] V. Kohnhauser und M. Pollhamer, *Entwicklungsqualität* (Praxisreihe Qualitätswissen). München, Wien: Hanser, 2013.
- [48] W. Masing, *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, 7. Aufl. (Hanser eLibrary). München: Hanser, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446466210>
- [49] A. Windolph, "Das V-Modell im Projektmanagement: Definition, Typen und Phasen," *Projekte leicht gemacht*, 23. Juli 2021. Zugriff am: 16. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://projekte-leicht-gemacht.de/blog/projektmanagement/klassisch/v-modell/>
- [50] OscarLiang.com. "How to Build an FPV Drone Tutorial (Analog FPV System)." Zugriff am: 19. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://oscarliang.com/how-to-build-fpv-drone-analog/#FPV-Setup>
- [51] OscarLiang.com. "Which FPV System Should You Buy in 2026? Analog, DJI, HDZero, Walksnail, Ascent, OpenIPC." Zugriff am: 19. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://oscarliang.com/fpv-system/#Analog-FPV-System>
- [52] Intel Deutschland GmbH. "2.4 GHz vs. 5 GHz vs. 6 GHz: Was ist der Unterschied?" Zugriff am: 19. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.intel.de/content/www/de/de/products/docs/wireless/2-4-vs-5ghz.html>
- [53] S. Burrell. "2,4-GHz-ISM-Bänder verstehen: Ein praktischer Leitfaden für alle." Zugriff am: 19. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://wraycastle.com/de/blogs/knowledge-base/2-4-ghz-ism?srsId=AfmBOooEIUBubwXkLICWa0xHtIJgNQoEkrMZFsmCIQG-Bevp_ZZdqQCHw
- [54] Elektronik-Kompendium.de. "IEEE 802.11b / WLAN 11 MBit." Zugriff am: 19. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0907031.htm>
- [55] Foxeer. "Foxeer T Rex Micro 1500TVL Low Latency Super WDR FPV Camera." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.foxeer.com/foxeer-t-rex-micro-1500tvl-low-latency-super-wdr-fpv-camera-g-308>

- [56] FPV24.com. "Hi-Def FPV Camera? Foxeer T-Rex 1500TVL FPV Camera - Review, Latency Test & Flight Footage." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://www.youtube.com/watch?v=hNLXt0fh_V8
- [57] Team Blacksheep. "TBS UNIFY PRO32 Manual V2." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.team-blacksheep.com/media/files/tbs-unify-pro32-manual.pdf>
- [58] Team Blacksheep. "TBS Unify Pro32 Nano 5G8 V1.1." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://www.team-blacksheep.com/products/prod:unifypro32_nano?srsId=AfmBOoow_Oq65galMC-bYRu_GWy-qpTCAWbR9TLzlxkGijhBXt6vLFSI
- [59] Team Blacksheep. "TBS Triumph Pro (SMA) Long Range." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://www.team-blacksheep.com/products/prod:triumph_pro_sma_lr
- [60] Wellshow. "1.13mm Coaxial Cable: Product No. D1130WS5BT (Black jacket)."
- [61] Taoglas. "Taoglas Cable Assembly Catalog."
- [62] B. Schweber. "Verständnis und Auswahl von Koaxialsteckverbindern und -kabelkonfektionen für den GHz-Bereich." Zugriff am: 21. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.digikey.de/de/articles/understanding-and-choosing-ghz-range-coaxial-connectors-and-cable-assemblies?srsId=AfmBOoorvLziyceDZJXsMKzx-quZ9yigxD3vN3rLBni2W2Ldrr0tuVEg>
- [63] Rotorama s.r.o. "Anleitung RC832 Mini."
- [64] Rotorama s.r.o. "RC832 Mini-Empfänger 4.9-5.8GHz - Rotorama." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.rotorama.de/product/rc832-mini-5ghz>
- [65] ImmersionRC. "Ifrontech 5.8GHz Uno5800 V2 AV Empfänger-Anleitung." Zugriff am: 21. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.live-hobby.de/out/media/ImmersionRC%20Ifrontech%205.8GHz%20Uno5800%20V2%20AV%20Empf%C3%A4nger-Anleitung.pdf>
- [66] The Imaging Source. "DFG/USB2pro - Video-auf-USB 2.0 Videosignalkonverter." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.theimagingsource.com/de-de/product/converter/dfgusb2pro/>
- [67] Analog Devices, Inc. "ADV7282A Datasheet." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.analog.com/en/products/ADV7282A.html>

- [68] Analog Devices, Inc. "ADV7282A-M Evaluatoin Board." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-adv7282a-m.html>
- [69] Analog Devices, Inc., "EVAL-ADV7282AMEBZ (Rev. 0)," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EVAL-ADV7282AMEBZ-UG-1175.pdf>
- [70] Analog Devices, Inc. "Schematics EVAL-ADV7282AMEBZ." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/adv7281am-adv7282am-32ebz-sch_a.pdf
- [71] Raspberry Pi Foundation. "Getting started - Raspberry Pi Documentation." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/getting-started.html>
- [72] K. Shann. "csi-2-usage.adoc at master." Zugriff am: 20. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://github.com/raspberrypi/documentation/blob/master/documentation/asciidoc/computers/camera/csi-2-usage.adoc>
- [73] XLSEMI. "Datasheet XL6019."
- [74] JOY-IT. "SBC-XL6019_DATENBLATT_2022-11-08."
- [75] Foxeer. "Anleitung Foxeer T-Rex Micro."
- [76] CNC Tech. "671-564-2.dwg."
- [77] Tensility International Corporation. "Datenblatt 30-00692."
- [78] Tensility International Corporation. "30-00692." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.tensility.com/products/30-00692>
- [79] CNC Tech. "CNC Tech 1002-001-BL-KIT | USB 2.0 Connector & Hood, Assembly A Type, BLACK, 4pcs Per Bag." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://cnctech.us/productdetails.asp?ID=20695>
- [80] Taoglas. "CAB.01036 Hirose U.FL to 300mm 1.13 to SMA(F)BKST." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.taoglas.com/product/cab-01036-hirose-u-fl-to-300mm-1-13-to-smafbkst/>
- [81] Delock. "Datenblatt 84895."
- [82] JOY-IT. "XL6019." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://joy-it.net/de/products/SBC-XL6019>

- [83] Delock. "Delock Produkte 84895 Delock Kabel USB 2.0 Typ-A Stecker > USB 2.0 Typ-B Stecker 1,0 m schwarz." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.delock.de/produkt/84895/merkmale.html>
- [84] Pasternack Enterprises Inc. "Reverse Polarity SMA Male to SMA Female Right Angle Adapter Specifications."
- [85] Pasternack. "RP-SMA Male to SMA Female Right Angle Adapter." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://www.pasternack.com/sma-male-sma-female-right-angle-adapter-pe91263-p.aspx?srsId=Afm-BOoq6pm95SF1qzcc60RFdAUQ3cUve3UuHmqv3CMOzl6_mkczvNd3PD
- [86] Analog Devices, Inc. "PCB Layout EVAL-ADV7282AMEBZ."
- [87] Raspberry Pi Foundation. "Datenblatt Raspberry Pi Zero 2W."
- [88] Raspberry Pi Ltd. "Raspberry Pi Zero 2W." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/>
- [89] Würth Elektronik. "WR-SMA PCB End Launch | Elektromechanische Bauelemente | Würth Elektronik Produktkatalog." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://www.we-online.com/de/components/products/COAX_SMA_CONNECTOR_PCB_END_LAUNCH?srsId=AfmBOorA4-x06YyiDqNTFoQQ0SylqK2jeOFNt-7vjow3DMEIfFwrWdY
- [90] elpro Harald Wirag Elektronikhandel e. K. "FA05A22P100-336633S ElectronAix FFC-Kabel, für Standard-ZIF-Steckerverbinder." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.elpro.org/de/electronaix-fa05-serie/239448-fa05a22p100-336633s.html>
- [91] Adafruit Industries. "Adafruit FPC Breakout for Raspberry Pi 5 DSI or RP2350 HSTX." Zugriff am: 23. März 2026. [Online.] Verfügbar: https://www.adafruit.com/product/6014?srsId=AfmBOopS0SCrHnqq158v_wAlsjoGD84Iln-sbd0q9lqpPraVnlu3FvYy
- [92] Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG. "60314202124525."
- [93] ElectroAix. "FA05xx33.docx."
- [94] MILAN S.r.l. a socio unico. "Technical Datasheet RG178 U Mil. C17."
- [95] Delock. "DS_DELOCK_88728_D."
- [96] Analog Devices, Inc. "Install DVP Eval Software." Zugriff am: 26. März 2026. [Online.] Verfügbar: <https://ez.analog.com/video/f/discussions/5561/install-dvp-eval-software>
- [97] VideoLAN. "VLC media player." Zugriff am: 11. April 2026. [Online.] Verfügbar: <https://images.videolan.org/vlc/index.de.html>

- [98] RICHWAVE. "RTC6715."
- [99] Tasker -. "Prodotto – data network - Tasker." Zugriff am: 10. April 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.tasker.it/en/products/data-network/code/?p=rg178-bu>
- [100] Delock. "Delock Produkte 88728 Delock Adapter RP-SMA Stecker > SMA Buchse." Zugriff am: 10. April 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.delock.de/produkt/88728/merkmale.html?f=s>
- [101] The Imaging Source. "Geräte-Treiber für DFG/USB2pro 2.1.0." Zugriff am: 12. April 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.theimagingsource.com/de-de/support/download/icwdmv2uprotis-2.1.0/>
- [102] The Imaging Source. "GenTL Producer für Non-GenICam Cameras (DirectShow) 2.0.0.390." Zugriff am: 12. April 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.theimagingsource.com/de-de/support/download/ic4gentlprodlegacywintis-2.0.0.390/>
- [103] The Imaging Source. "IC Capture - Bild-Akquisition und Bild-Vermessung 4.1.0.720." Zugriff am: 12. April 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.theimagingsource.com/de-de/support/download/iccapture-4.1.0.720/>
- [104] The Imaging Source. "IC Fullscreen Presenter - Videoanzeige auf dem kompletten Bildschirm 1.3.0.0." Zugriff am: 12. April 2026. [Online.] Verfügbar: <https://www.theimagingsource.com/de-de/support/download/icpresenter-1.3.0.0/>
- [105] Autodesk GmbH. "Autodesk." Zugriff am: 12. April 2026. [Online.] Verfügbar: <https://manage.autodesk.com/products/INVPROSA?version=2025&platform=WIN64&language=EINT>

Verzeichnis des Anhangs

Abbildungsverzeichnis des Anhangs.....	A
Tabellenverzeichnis des Anhangs.....	C
Anhang 1: Komponentenliste	D
Anhang 2: Datenblätter, Anleitungen und Quellen der Komponenten	F
Anhang 3: Schaltpläne	H
Anhang 4: Konfiguration des VLC Media Player	K
Anhang 5: Verwendete Software in der Implementierung und Verifikation	P
Anhang 6: 3D-Modelle und Zeichnungen der Halterungen	R
Anhang 7: Feldversuche.....	EE

Anhang

Abbildungsverzeichnis des Anhangs

A-Abbildung 1 Schaltplan für die Senderseite	H
A-Abbildung 2 Schaltplan für die Empfängerseite - Variante A.....	I
A-Abbildung 3 Schaltplan für die Empfängerseite - Variante B.....	J
A-Abbildung 4 Schritt 1 der VLC Media Player Konfiguration	K
A-Abbildung 5 Schritt 2 der VLC Media Player Konfiguration	K
A-Abbildung 6 Schritt 3 der VLC Media Player Konfiguration	L
A-Abbildung 7 Schritt 4 der VLC Media Player Konfiguration	L
A-Abbildung 8 Schritt 5 der VLC Media Player Konfiguration	M
A-Abbildung 9 Schritt 6 der VLC Media Player Konfiguration	M
A-Abbildung 10 Erfolgreiche Darstellung des Videosignals nach der VLC Media Player Konfiguration	N
A-Abbildung 11 Einstellung zum Nachweis der korrekten Konfiguration des VLC Media Player Konfiguration.....	N
A-Abbildung 12 Nachweises der korrekten Konfiguration des VLC Media Player Konfiguration.....	O
A-Abbildung 13 Zeichnung der Halterung der Kameraeinheit	S
A-Abbildung 14 Zeichnung des Oberteils der Halterung der Sendereinheit	T
A-Abbildung 15 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Sendereinheit.....	U
A-Abbildung 16 Zeichnung des Oberteils der Halterung der Antenne	V
A-Abbildung 17 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Antenne	W
A-Abbildung 18 Zeichnung des Oberteils der Halterung der Empfängereinheit.....	X
A-Abbildung 19 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Empfängereinheit.....	Y
A-Abbildung 20 Zeichnung des Oberteils der Halterung der Digitalisierungseinheit...	Z
A-Abbildung 21 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Digitalisierungseinheit, Seite 1	AA
A-Abbildung 22 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Digitalisierungseinheit, Seite 2	BB
A-Abbildung 23 Zeichnung des Oberteils der Halterung des Spannungswandlers..	CC
A-Abbildung 24 Zeichnung des Unterteils der Halterung des Spannungswandlers. .	DD

A-Abbildung 25 Darstellung der Funkstrecke zwischen Sender- und Empfangseinheit
beim Feldversuch unter Freisichtbedingungen (LOS), in Orange
dargestellt FF

A-Abbildung 26 Darstellung der Funkstrecke zwischen Sender- und Empfangseinheit
beim Feldversuch innerhalb eines Gebäudes, in Grün dargestellt..... FF

Tabellenverzeichnis des Anhangs

A-Tabelle 1 Komponentenliste.....	E
A-Tabelle 2 Datenblätter, Anleitungen und Quellen der Komponenten	G
A-Tabelle 3 Name, Version, Installationsdatei und Bezugsquelle der verwendeten Software	Q
A-Tabelle 4 Name der Zeichnung und der DWG-Datei der verwendeten Halterungen	R
A-Tabelle 5 Geografische Koordinaten der Sender- und Empfängerseite bei den Feldversuchen	EE

Anhang 1: Komponentenliste

Komponente	Bezeichnung	Hersteller	Beschreibung	Anzahl
1	T-Rex Micro	Foxeer	Kamera mit CVBS-Ausgang	1
	OSD-Controller		Steuerungseinheit für Einstellungen mit Anschlusskabel	1
	Verbindungskabel		Anschlusskabel der Kamera	1
2	Unify Pro32 Nano	The Black Sheep	5,8 GHz VTX	1
3	CAB.01039	Taoglas limited	U.FL auf SMA Buchse Koaxialkabel	1
4	Triumph Pro	The Black Sheep	5,8 GHz Antenne	2
5	PE91263	Pasternack	SMA Buchse auf RP-SMA Stecker Winkeladapter	1
6	RC832 Mini	k.A.	5,8 GHz VRX	1
	Verbindungskabel		3,5 mm Klinke auf Cinch	1
7	DFG/USBpro2	The Imaging Source	Videosignalkonverter	1
8	84895	Delock	USB 2.0 Typ A auf Typ B Kabel	1
9	EVAL-ADV7282AME BZ	Analog Devices	Evaluationsleiterplatte für einen ADV7282A-M	1
	Netzteil		7,5 V Spannungsversorgung	1

Komponente	Bezeichnung	Hersteller	Beschreibung	Anzahl
	Verbindungs-kabel		USB 2.0 Typ B Micro auf Typ A	1
10	603142021245 25	Würth Elektronik	SMA Stecker für Leiterplatten	4
11	FPC Breakout 22 Pin	Adafruit	MIPI CSI Adapter	1
12	FA05A22P100 -336633S	ElectronAix	22-poliges Flachbandkabel	1
13	PI Zero 2 W	Raspberry Pi Foundation	Einplatinencomputer	1
	Verbindungs-kabel		USB 2.0 Typ B Micro auf Typ A	1
14	Speicherkarte	SanDisk	Mikro SD-Karte 32 GB	1
15	1002-001-BL-KIT	CNC Tech	USB 2.0 Typ A Stecker	2
16	30-00692	Tensility International Corp.	2x24 AWG PVC Kabel	2
17	SBC-XL6019	JOY-IT	Spannungsregler	1
18	RG178	k.A.	Koaxialkabel SMA auf SMA	1
17	88728	Delock	SMA Buchse auf RP-SMA Stecker Adapter	1

A-Tabelle 1 Komponentenliste

Die Komponenten für die mechanische Umsetzung sind kein Bestandteil der Arbeit und werden deshalb nicht mit aufgeführt.

Anhang 2: Datenblätter, Anleitungen und Quellen der Komponenten

Komponente	Datenblatt	Anleitung	Quelle
T-Rex Micro	k.A.	A_Foxeer_T-Rex_Micro [75]	[55]
Unify Pro32 Nano	k.A.	A_TBS_Unify_Pro32 [57]	[58]
CAB.01039	D_CAB.01036 [61]	k.A.	[80]
	D_Koaxialkabel [60]		
Triumph Pro	k.A.	k.A.	[59]
PE91263	D_PE91263 [84]	k.A.	[85]
RC832 Mini	k.A.	A_RC832_Mini [63]	[64]
DFG/USBpro2	k.A.	k.A.	[66]
84895	D_84895 [81]	k.A.	[83]
EVAL-ADV7282AMEBZ	D_EVAL-ADV7282A [67]	A_EVAL-ADV7282AMEBZ [69]	[68]
	L_EVAL-ADV7282AMEBZ [86]		
	S_EVAL-ADV7282AMEBZ [70]		
60314202124525	D_60314202124525 [92]	k.A.	[89]

Komponente	Datenblatt	Anleitung	Quelle
FPC Breakout 22 Pin	k.A.	k.A.	[91]
FA05A22P100-336633S	D_FA05A22P100-33 [93]		[90]
Pi Zero 2 W	D_Raspberry_Pi_Zero_2W [87]	[71]	[88]
1002-001-BL-KIT	D_1002-001-BL-KIT [76]	k.A.	[79]
30-00692	D_30-00692 [77]	k.A.	[78]
SBC-XL6019	D_SBC-XL6019 [74]	k.A.	[82]
	D_XL6019 [73]		
RG178	D_Koaxiakabel-RG178 [94]	k.A.	[99]
88728	D_DELOCK_88728 [95]	k.A.	[100]

A-Tabelle 2 Datenblätter, Anleitungen und Quellen der Komponenten

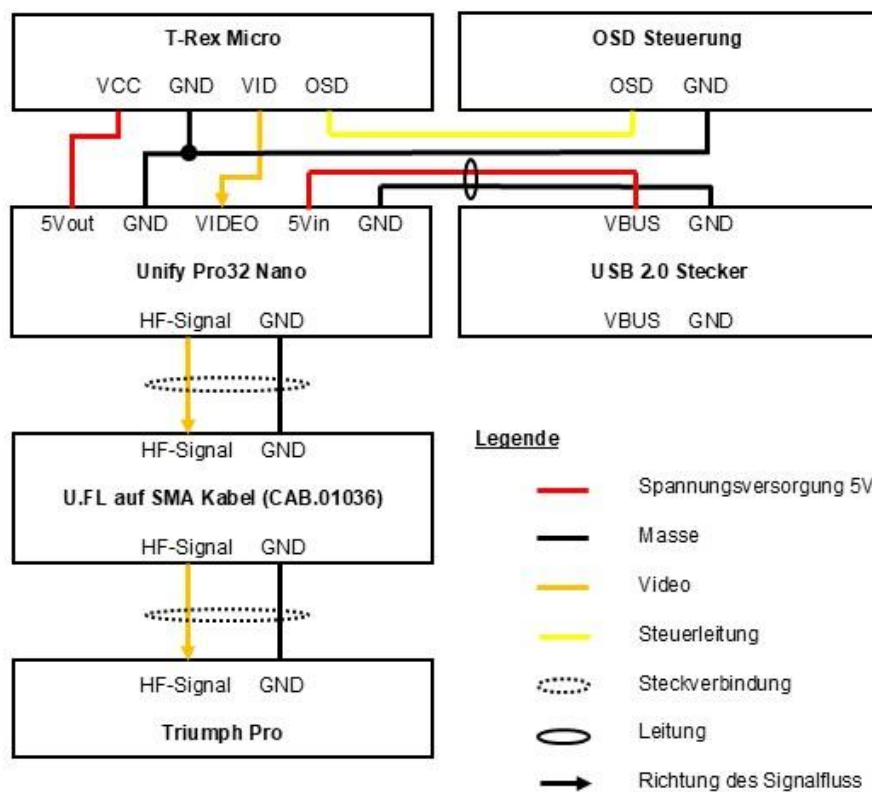
Alle Dokumente in dieser Tabelle sind ebenfalls auf dem dieser Arbeit beigefügten elektronischen Medium enthalten. Sie sind unter dem in der Tabelle dargestellten Namen unter folgendem Dateipfad zu finden:

...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_2_Datenblaetter_Anleitungen\

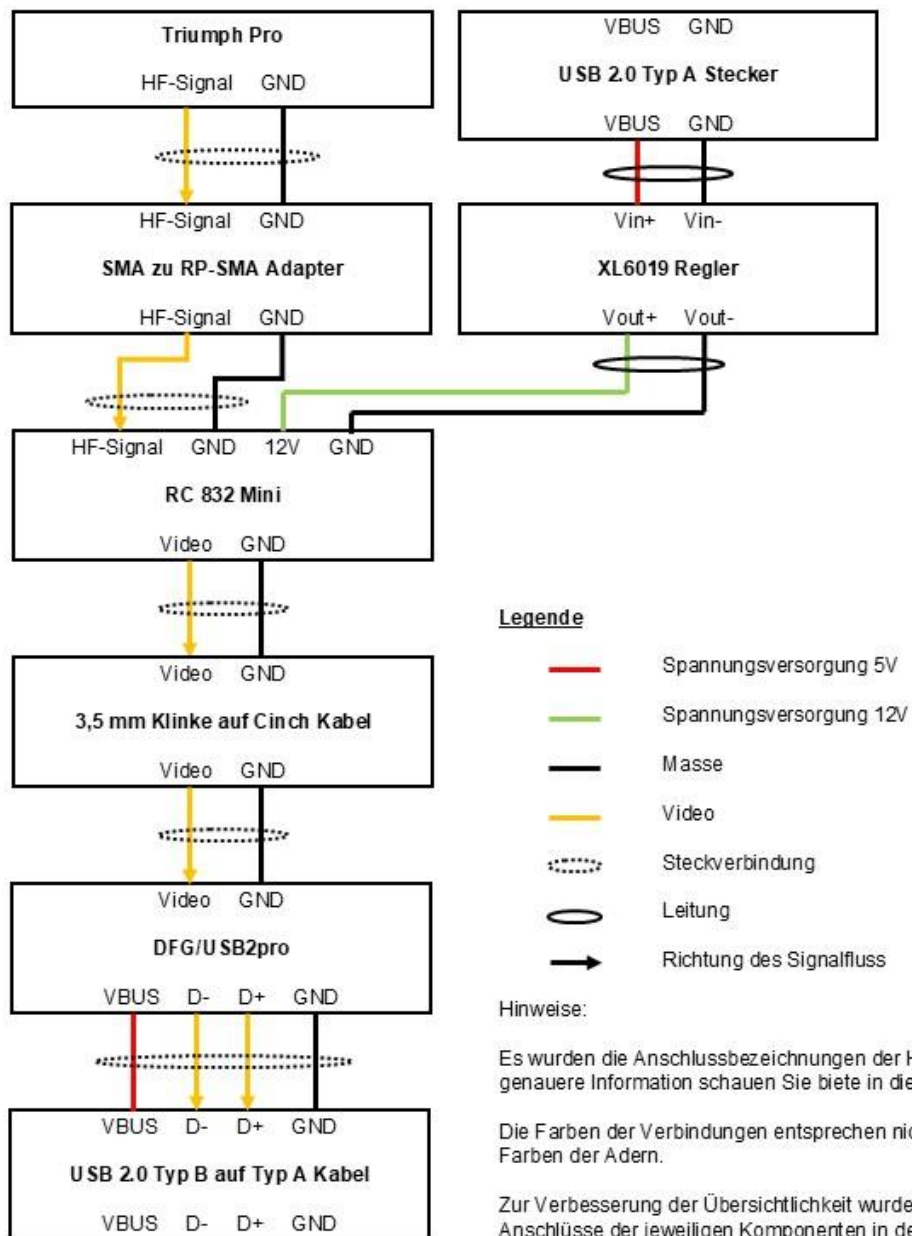
Anhang 3: Schaltpläne

Alle Schaltpläne sind ebenfalls auf dem dieser Arbeit beigefügten elektronischen Medium enthalten. Sie sind unter dem angegebenen Namen unter folgendem Dateipfad zu finden:

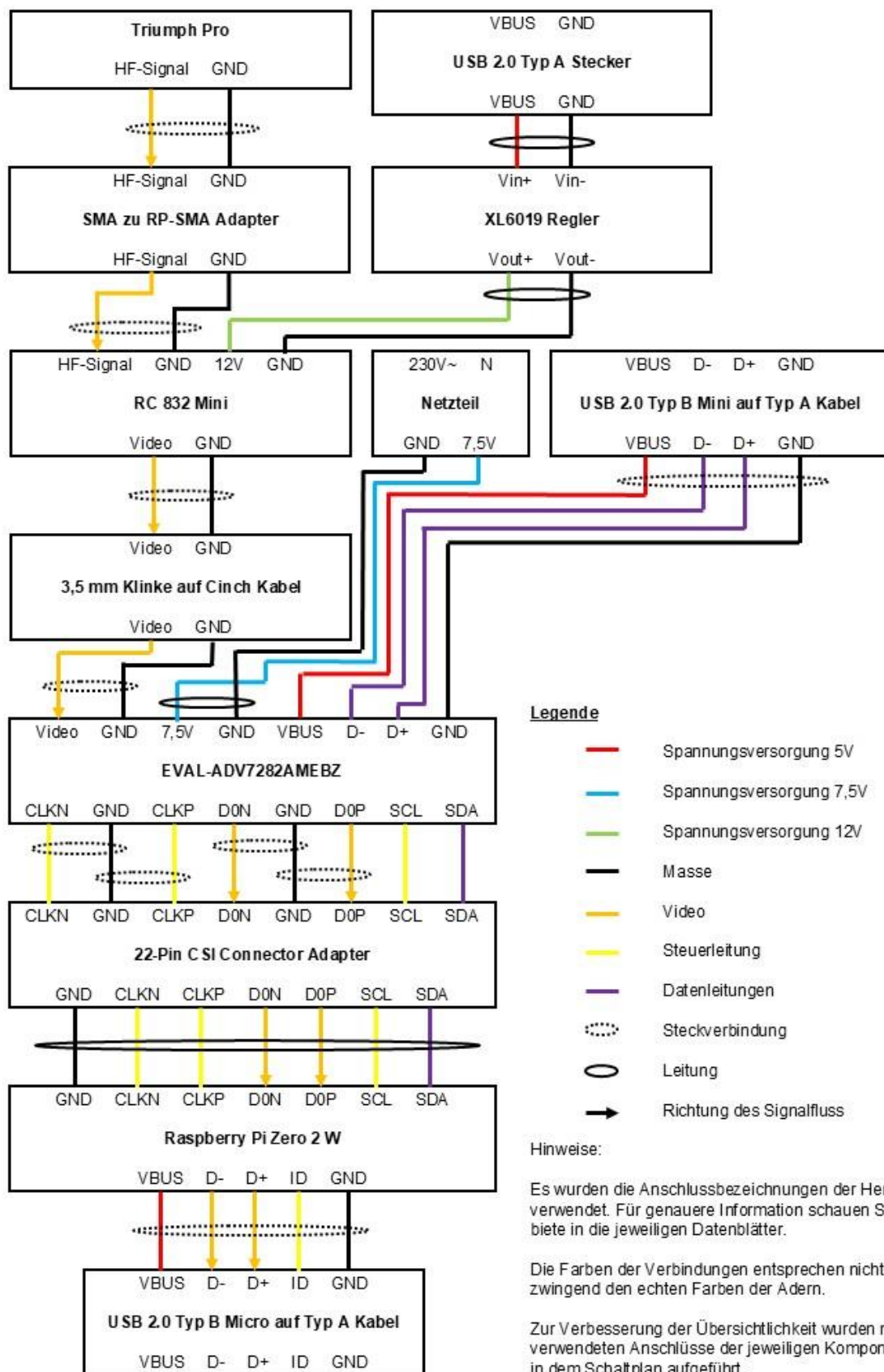
...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_3_Schaltplaene\



A-Abbildung 1 Schaltplan für die Senderseite



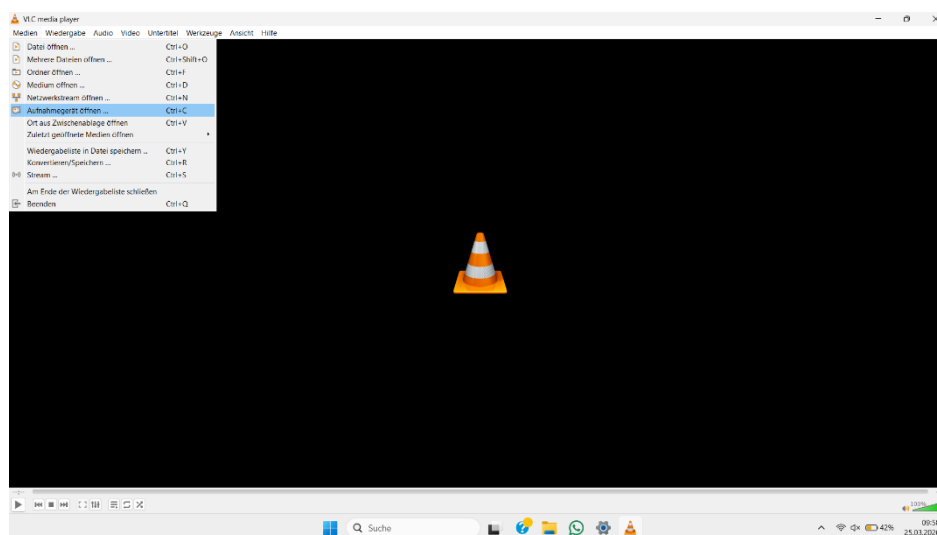
A-Abbildung 2 Schaltplan für die Empfängerseite - Variante A



A-Abbildung 3 Schaltplan für die Empfängerseite - Variante B

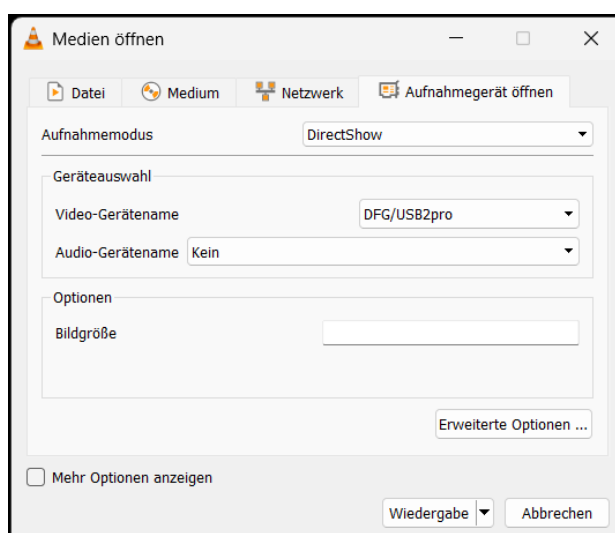
Anhang 4: Konfiguration des VLC Media Player

Zur korrekten Darstellung eines digitalisierten analogen Videosignals im VLC Media Player sind die folgenden Schritte in der angegebenen Reihenfolge durchzuführen.



A-Abbildung 4 Schritt 1 der VLC Media Player Konfiguration

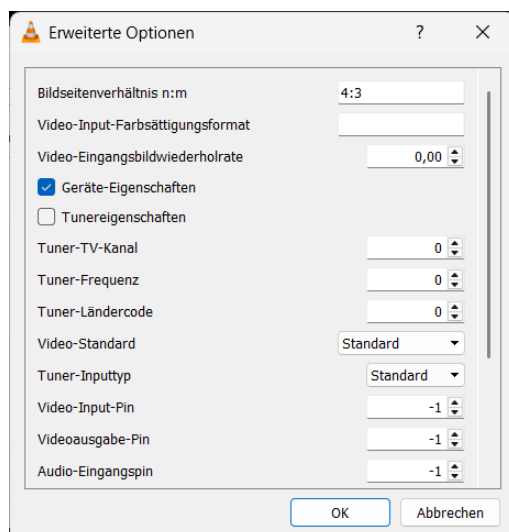
Schritt 1: Nach dem Start des Programms ist in der Menüleiste der Reiter „Medien“ auszuwählen. Anschließend ist die Option „Aufnahmegerät öffnen“ anzuklicken, um den Dialog zur Konfiguration externer Videoquellen zu öffnen.



A-Abbildung 5 Schritt 2 der VLC Media Player Konfiguration

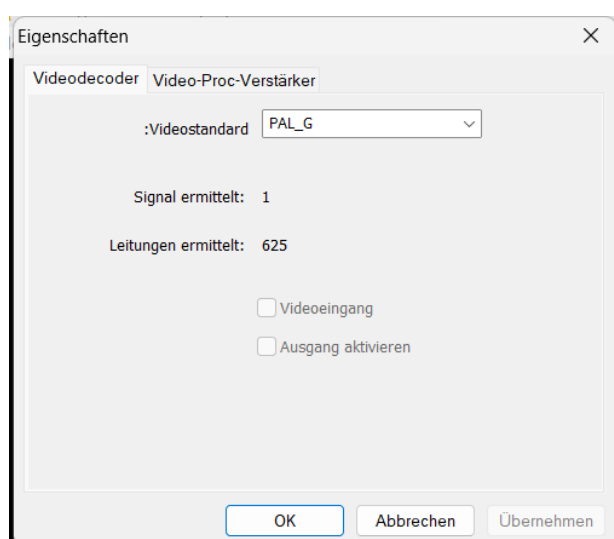
Schritt 2: Im daraufhin erscheinenden Fenster „Medien öffnen“ ist der Reiter „Aufnahmegerät öffnen“ zu wählen. Im Dropdown-Menü „Aufnahmemodus“ ist „DirectShow“

auszuwählen, sofern diese Einstellung nicht bereits voreingestellt ist. Dadurch wird sichergestellt, dass das angeschlossene Videoaufnahmegerät korrekt angesprochen wird. In der Geräteauswahl ist unter „Video-Gerätename“ das Gerät „DFG/USB2pro“ auszuwählen. Anschließend ist der Button „Erweiterte Optionen“ anzuklicken.



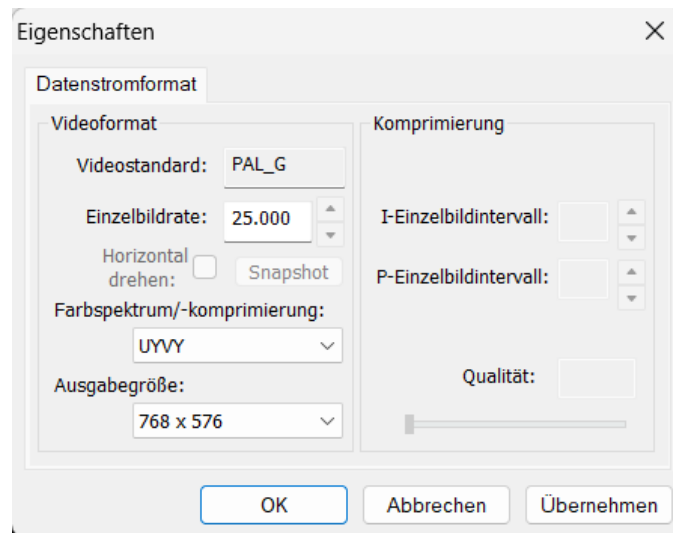
A-Abbildung 6 Schritt 3 der VLC Media Player Konfiguration

Schritt 3: Im sich öffnenden Dialogfenster „Erweiterte Optionen“ sind folgende Einstellungen vorzunehmen. Das „Bildseitenverhältnis n:m“ ist auf „4:3“ einzustellen. Als nächstes ist die Option „Geräte-Eigenschaften“ durch Setzen eines Hakens in der Checkbox zu aktivieren. Anschließend ist das Dialogfenster mit Bestätigung durch Klicken des „OK“-Buttons durchzuführen.



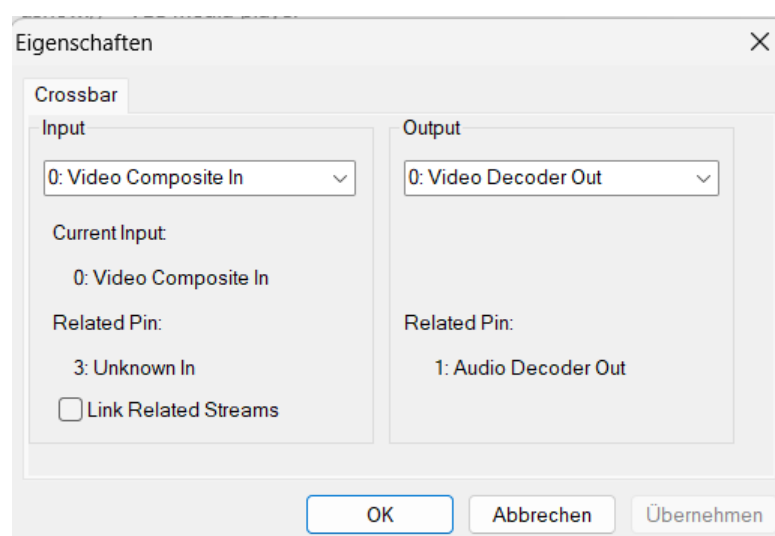
A-Abbildung 7 Schritt 4 der VLC Media Player Konfiguration

Schritt 4: Im Anschluss wird das Fenster „Eigenschaften“ geöffnet. In diesem ist zum Reiter „Videodecoder“ zu wechseln. Dort ist als Videostandard „PAL_G“ auszuwählen. Anschließend kann das Fenster mit Bestätigung des „OK“-Buttons geschlossen werden.



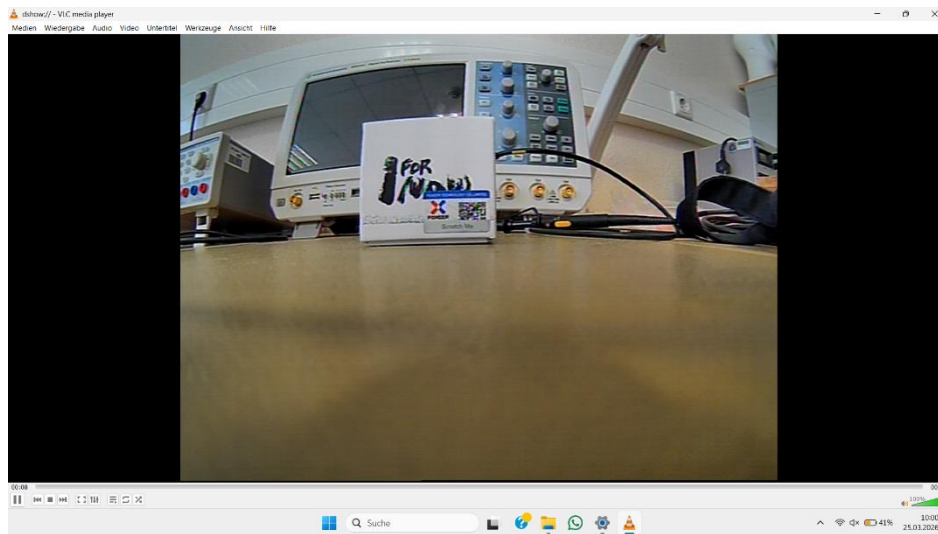
A-Abbildung 8 Schritt 5 der VLC Media Player Konfiguration

Schritt 5: Das Fenster „Eigenschaften“ öffnet sich erneut. Hier ist in dem Reiter „Datenstromformat“ zu wechseln. Anschließend sind die Parameter entsprechend dem Standard eines CVBS-Signals nach PAL festzulegen. Die „Einzelbildrate“ beträgt „25“ Bilder pro Sekunde. Das „Farbspektrum/-komprimierung“ ist auf „UYVY“ zu stellen. Die „Ausgabegröße“ entspricht der Auflösung und ist auf „768 × 576“ Pixel einzustellen. Anschließend kann das Fenster mit Bestätigung des „OK“-Buttons geschlossen werden.

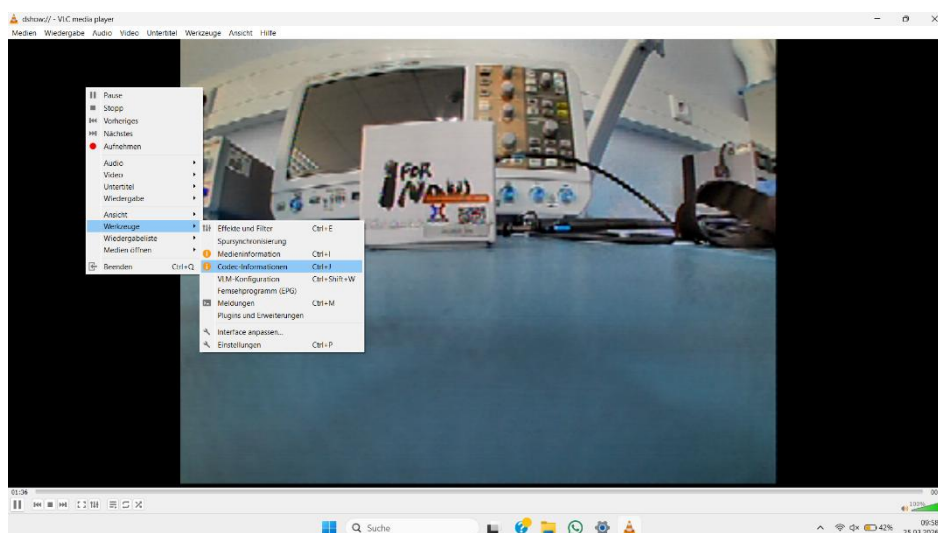


A-Abbildung 9 Schritt 6 der VLC Media Player Konfiguration

Schritt 6: Im Anschluss wird das Fenster „Eigenschaften“ erneut geöffnet. Im Reiter „Crossbar“ sind die Signalpfade korrekt zuzuweisen. Der „Input“ ist auf „0: Video Composite In“ und der „Output“ auf „0: Video Decoder Out“ zu stellen. Diese Zuordnung stellt sicher, dass das analoge Composite-Signal korrekt zum Decoder geleitet wird. Anschließend kann das Fenster mit Bestätigung des „OK“- Buttons geschlossen werden. Nach Bestätigung aller Einstellungen wird der Datenstrom aktiviert und das digitalisierte Videosignal im Wiedergabefenster des VLC Media Player angezeigt (siehe A-Abbildung 10).

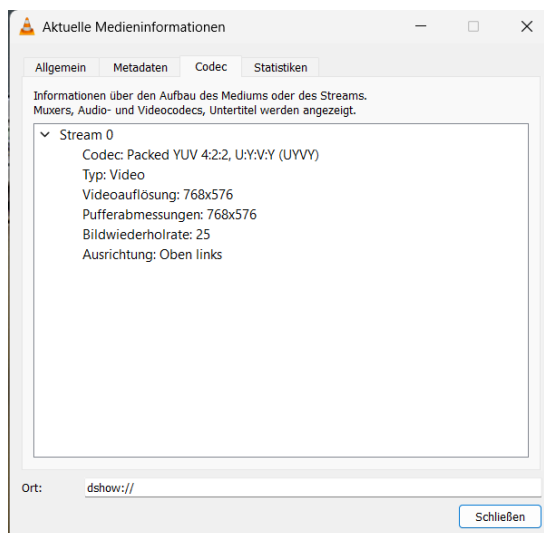


A-Abbildung 10 Erfolgreiche Darstellung des Videosignals nach der VLC Media Player Konfiguration



A-Abbildung 11 Einstellung zum Nachweis der korrekten Konfiguration des VLC Media Player Konfiguration

Schritt 7: Zur Überprüfung der aktiven Parameter ist ein Rechtsklick auf das Videobild auszuführen. Im Kontextmenü ist unter „Werkzeuge“ die Option „Codec-Informationen“ auszuwählen.



A-Abbildung 12 Nachweises der korrekten Konfiguration des VLC Media Player Konfiguration

Im dem darauf öffnenden Fenster „Aktuelle Medieninformationen“ werden unter dem Reiter „Codec“ die Eigenschaften des aktiven Streams angezeigt. Dabei ist zu überprüfen, dass das Farbformat UYVY (YUV 4:2:2) verwendet wird, die Auflösung 768×576 Pixel beträgt, die Bildwiederholrate 25 Bilder pro Sekunde entspricht. Sind diese Parameter korrekt gesetzt, ist von einer erfolgreichen Konfiguration und Darstellung des digitalisierten analogen Videosignals auszugehen.

Anhang 5: Verwendete Software in der Implementierung und Verifikation

Software	Version	Installationsdatei	Dateipfad	Quelle
Geräte-Treiber für DSG/USB2pro	2.1.0	drvInstaller.exe	...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_5_Software\DFG_USB2pro\Geraete-Treiber_für_DSG_USB2pro\	[101]
GenTL Producer/ IC4 Treiber	2.0.0.390	ic4-gentl-driver-directshow-2.0.0.390-win64.msi	...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_5_Software\DFG_USB2pro\GenTL_Producer_IC4_Treiber\	[102]
IC Capture 4	4.1.0.720	ic-capture_4.1.0.720_win64.msi	...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_5_Software\DFG_USB2pro\IC_Capture_4\	[103]
IC Presenter	1.3.0.0	icpresenter_setup_1.3.0.0.exe	...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_5_Software\DFG_USB2pro\IC_Presenter\	[104]
VLC Media Player	3.0.23	vlc-3.0.23-win64.exe	...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_5_Software\VLC_Media_Player\	[97]
DVP Evaluation Software	10-14-11	Install DVP Eval Latest Source 10-14-11.exe	...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_5_Software\EVAL-ADV7282AMEBZ\DVP_Evaluation_Software\	[96]

Software	Version	Installationsdatei	Dateipfad	Quelle
ADV7282A-M Script Files	5.2	-	...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_5_Software\EVAL-ADV7282AMEBZ\ADV7282AM_Cust\	[68]
Autodesk Inventor Professional 2025	Build 162	Autodesk_Inventor_Professional_2025_de-DE_setup_webinstall.exe	...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_5_Software\Autodesk_Inventor_Professional\	[105]

A-Tabelle 3 Name, Version, Installationsdatei und Bezugsquelle der verwendeten Software

Alle Installationsdateien in dieser Tabelle sind ebenfalls auf dem dieser Arbeit beigefügten elektronischen Medium enthalten. Sie sind unter dem in der Tabelle angegebenen Dateipfad unter dem Namen der Installationsdatei finden.

Anhang 6: 3D-Modelle und Zeichnungen der Halterungen

Halterung	Zeichnung	DWG-Datei
Kameraeinheit	Zeichnung_Kamera.pdf	Halterung_Kamera.dwg
Sendereinheit	Zeichnung_Sender_Oberteil.pdf	Halterung_Sender_Oberteil.dwg
	Zeichnung_Sender_Unterteil.pdf	Halterung_Sender_Unterteil.dwg
Antenne	Zeichnung_Antenne_Oberteil.pdf	Halterung_Antenne_Oberteil.dwg
	Zeichnung_Antenne_Unterteil.pdf	Halterung_Antenne_Unterteil.dwg
Empfängereinheit	Zeichnung_Empfaenger_Oberteil.pdf	Halterung_Empfaenger_Oberteil.dwg
	Zeichnung_Empfaenger_Unterteil.pdf	Halterung_Empfaenger_Unterteil.dwg
Digitalisierungseinheit	Zeichnung_Digitalisierung_Oberteil.pdf	Halterung_Digitalisierung_Oberteil.dwg
	Zeichnung_Digitalisierung_Unterteil.pdf	Halterung_Digitalisierung_Unterteil.dwg
Spannungswandler	Zeichnung_Spannungsversorgung_Oberteil.pdf	Halterung_Spannungsversorgung_Oberteil.dwg
	Zeichnung_Spannungsversorgung_Unterteil.pdf	Halterung_Spannungsversorgung_Unterteil.dwg

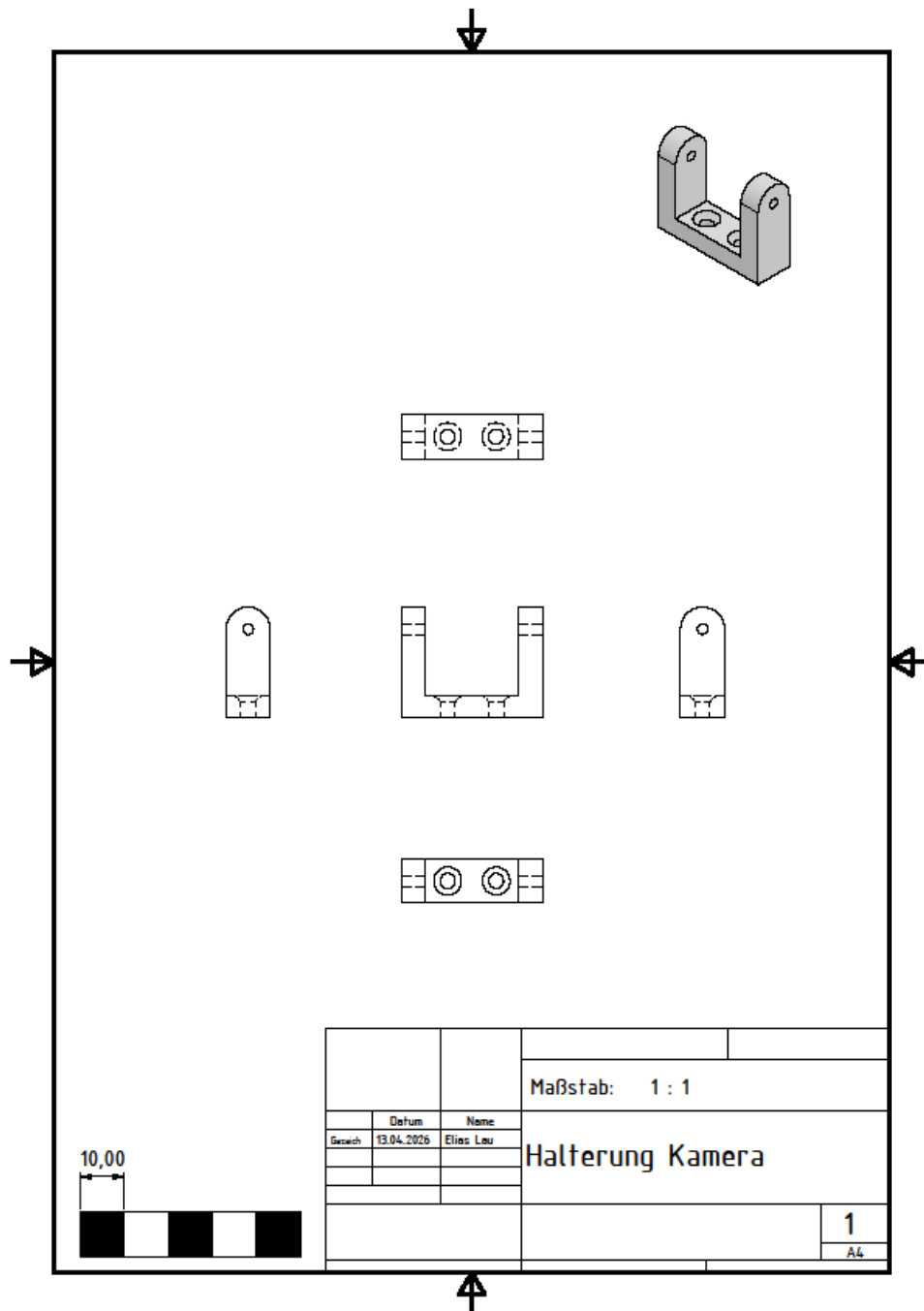
A-Tabelle 4 Name der Zeichnung und der DWG-Datei der verwendeten Halterungen

Alle in A-Tabelle 4 benannten Dateien sind auf dem dieser Arbeit beigefügten elektronischen Medium enthalten. Die Konstruktionsmodelle sind unter dem in der Tabelle dargestellten Namen unter folgendem Dateipfad zu finden:

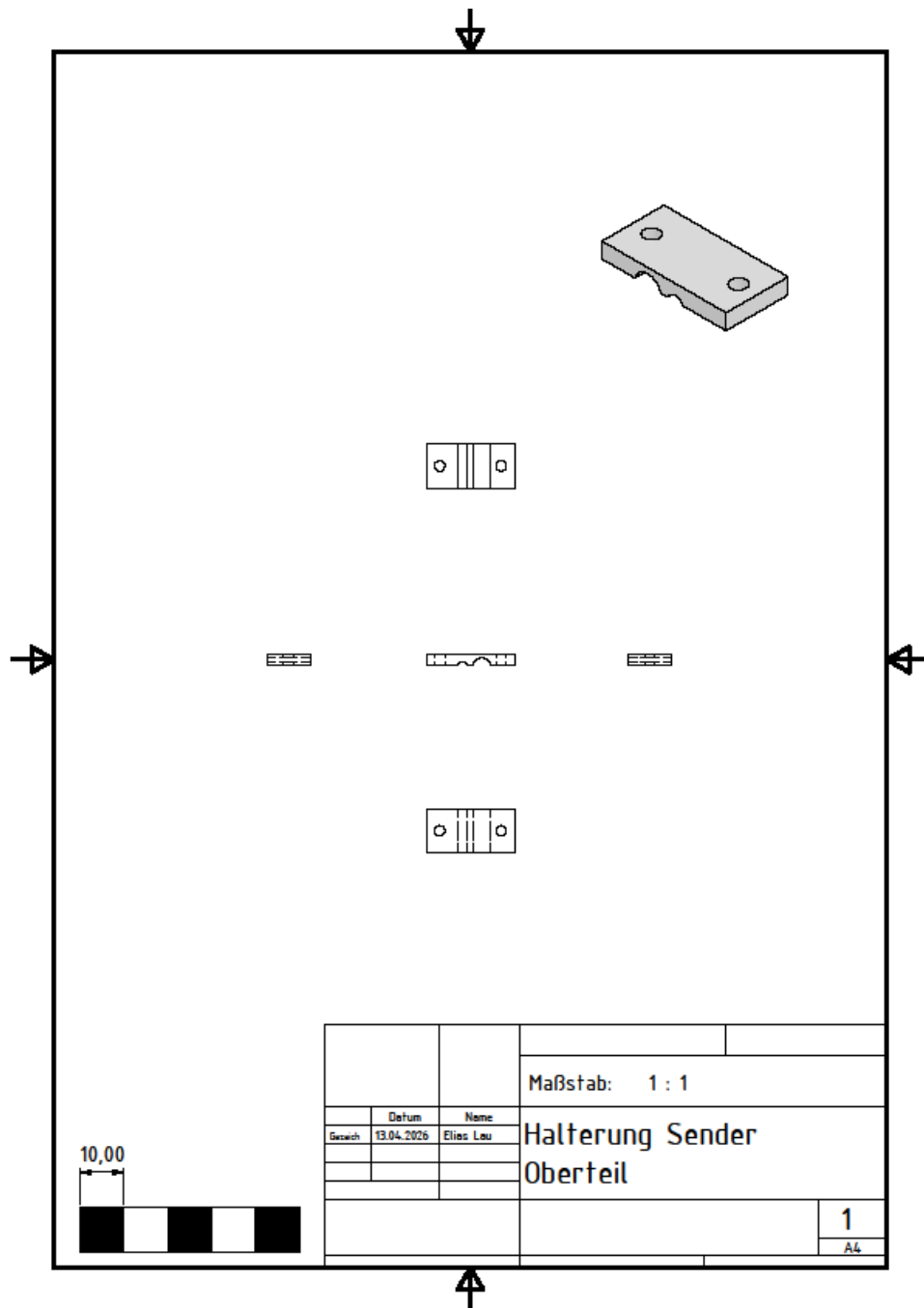
...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_6_3D_Modelle\Konstruktionsmodelle\

Die Zeichnungen, welche in den folgenden A-Abbildungen 13 bis 24 abgebildet werden, sind unter dem in der Tabelle dargestellten Namen unter folgendem Dateipfad zu finden:

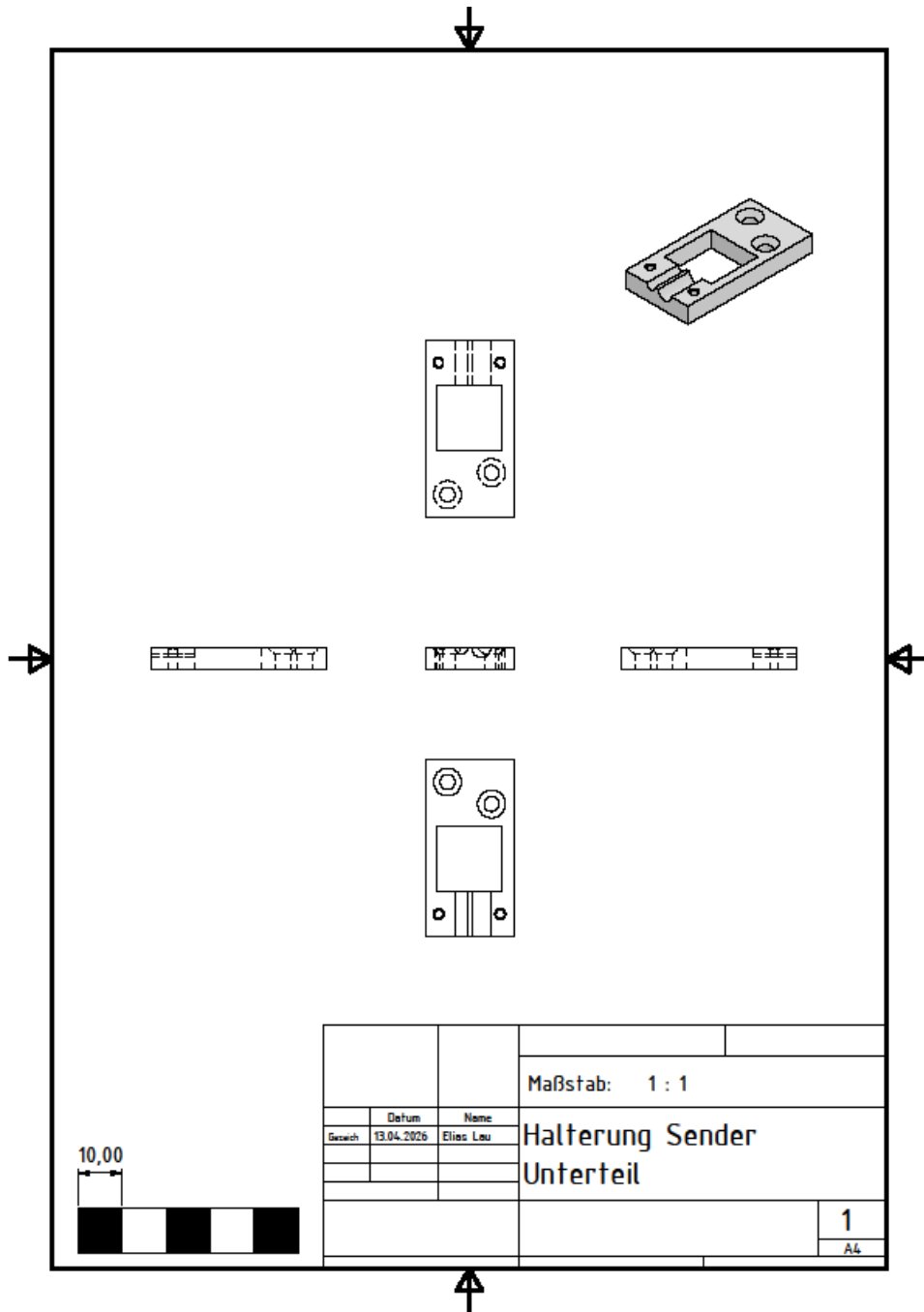
...\Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_6_3D_Modelle\Zeichnungen\



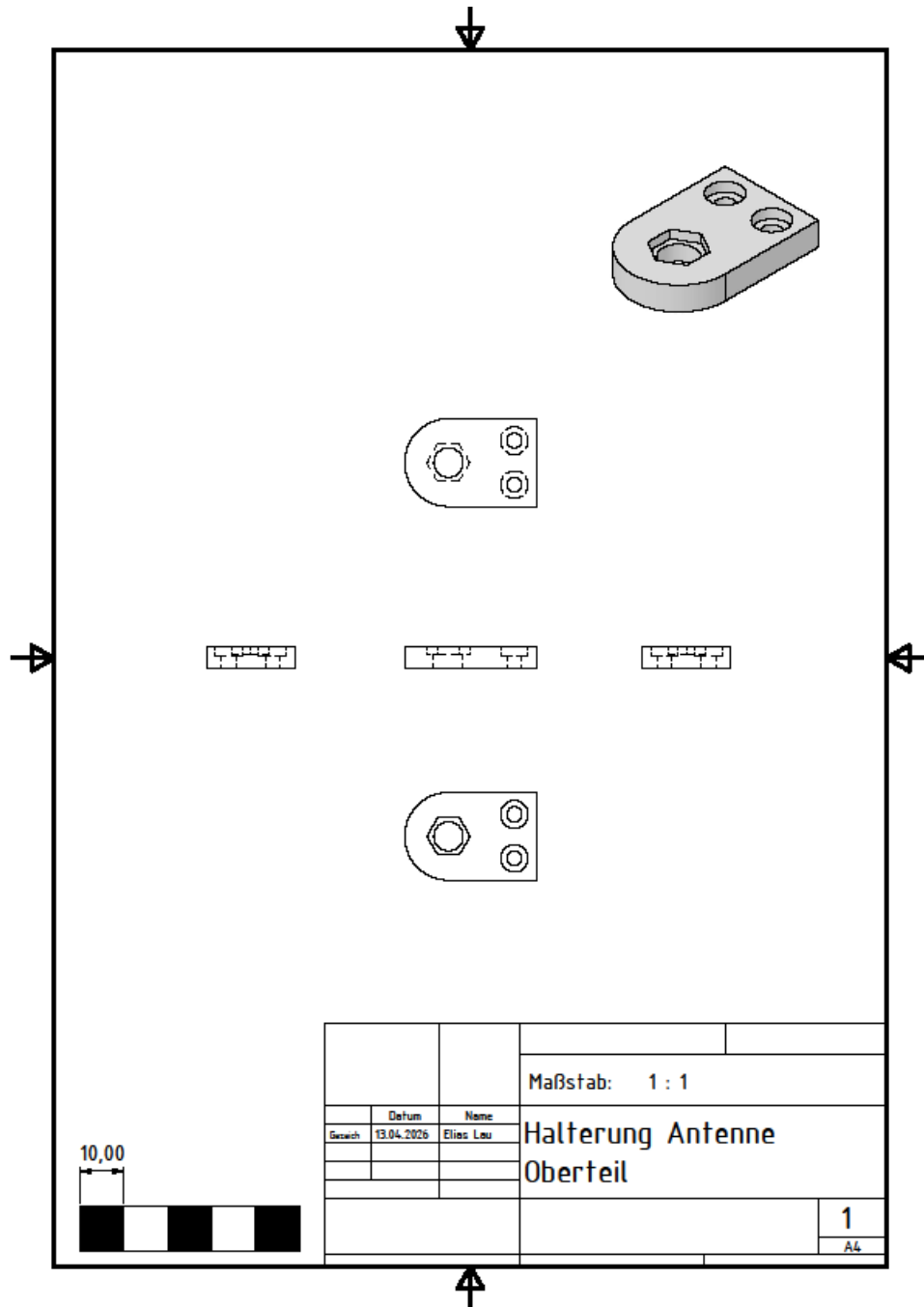
A-Abbildung 13 Zeichnung der Halterung der Kameraeinheit



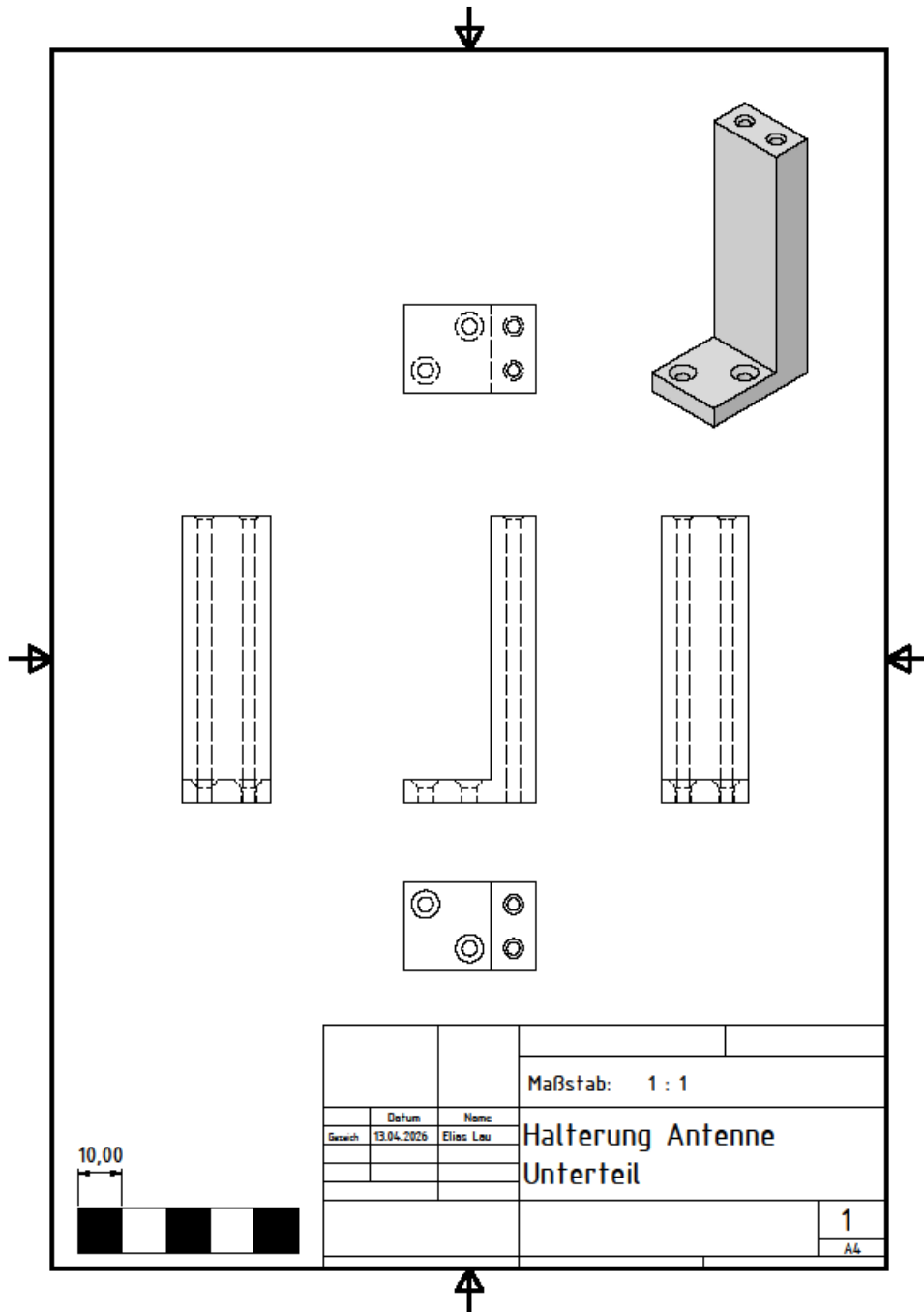
A-Abbildung 14 Zeichnung des Oberteils der Halterung der Sendereinheit



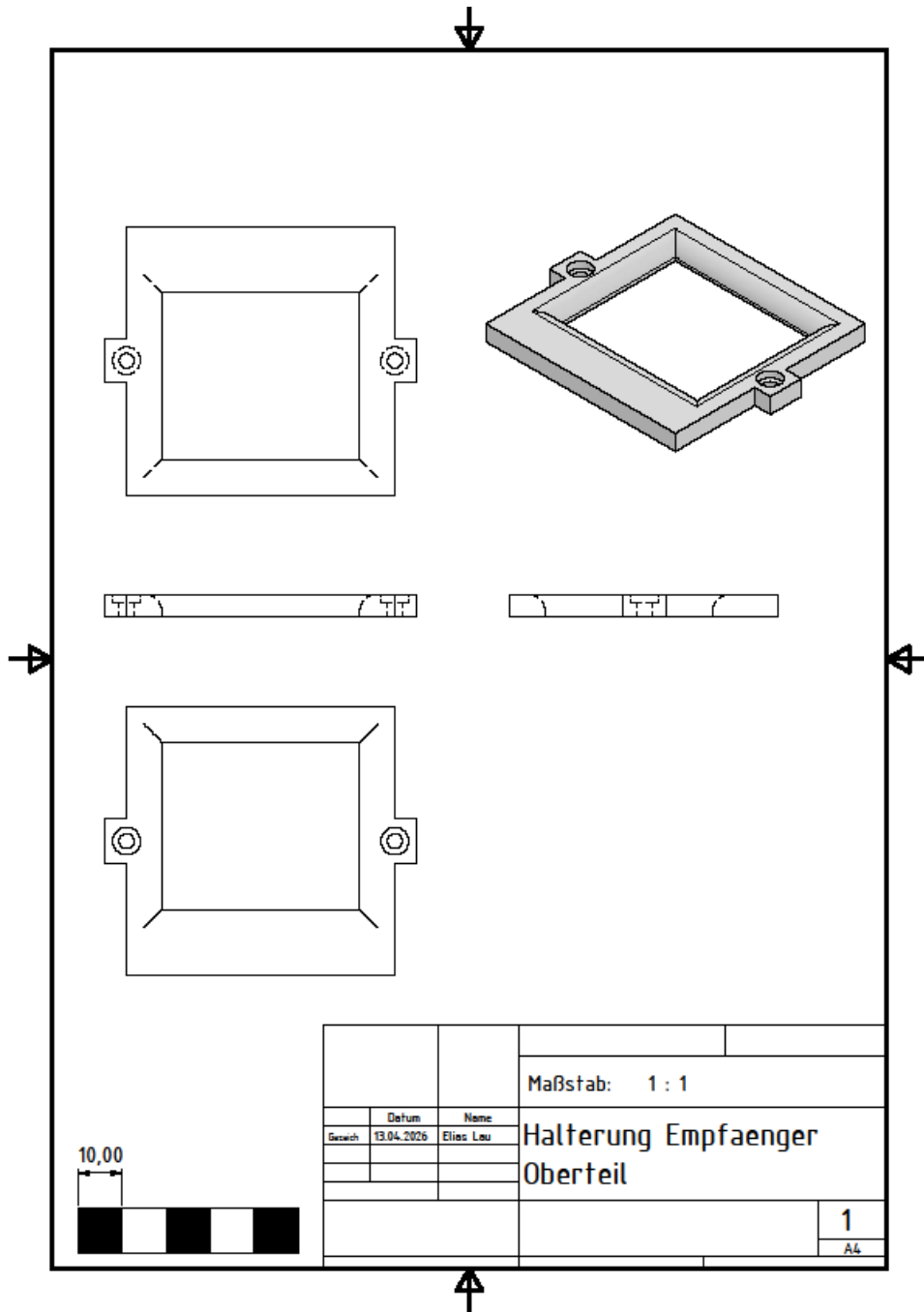
A-Abbildung 15 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Sendereinheit



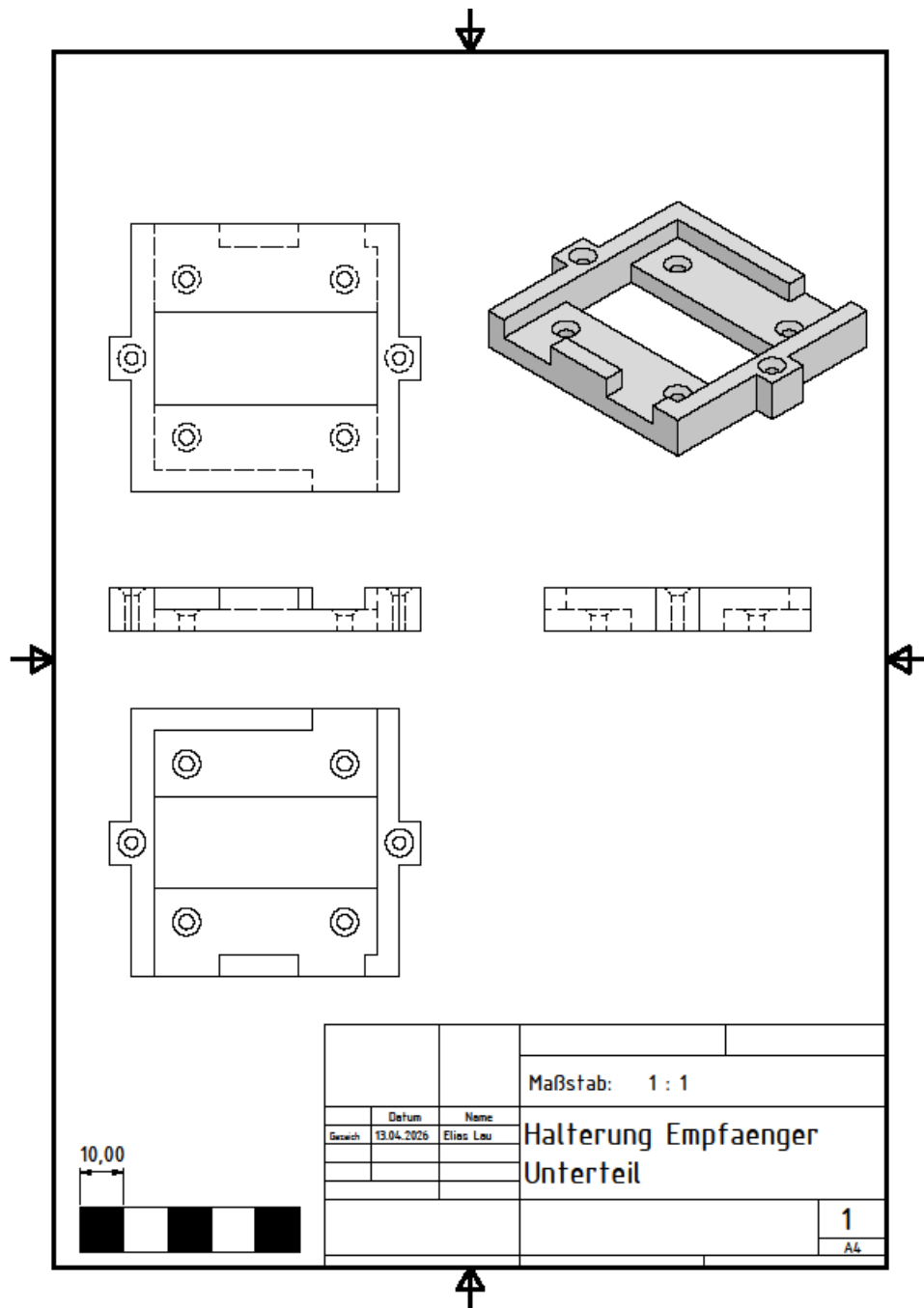
A-Abbildung 16 Zeichnung des Oberteils der Halterung der Antenne



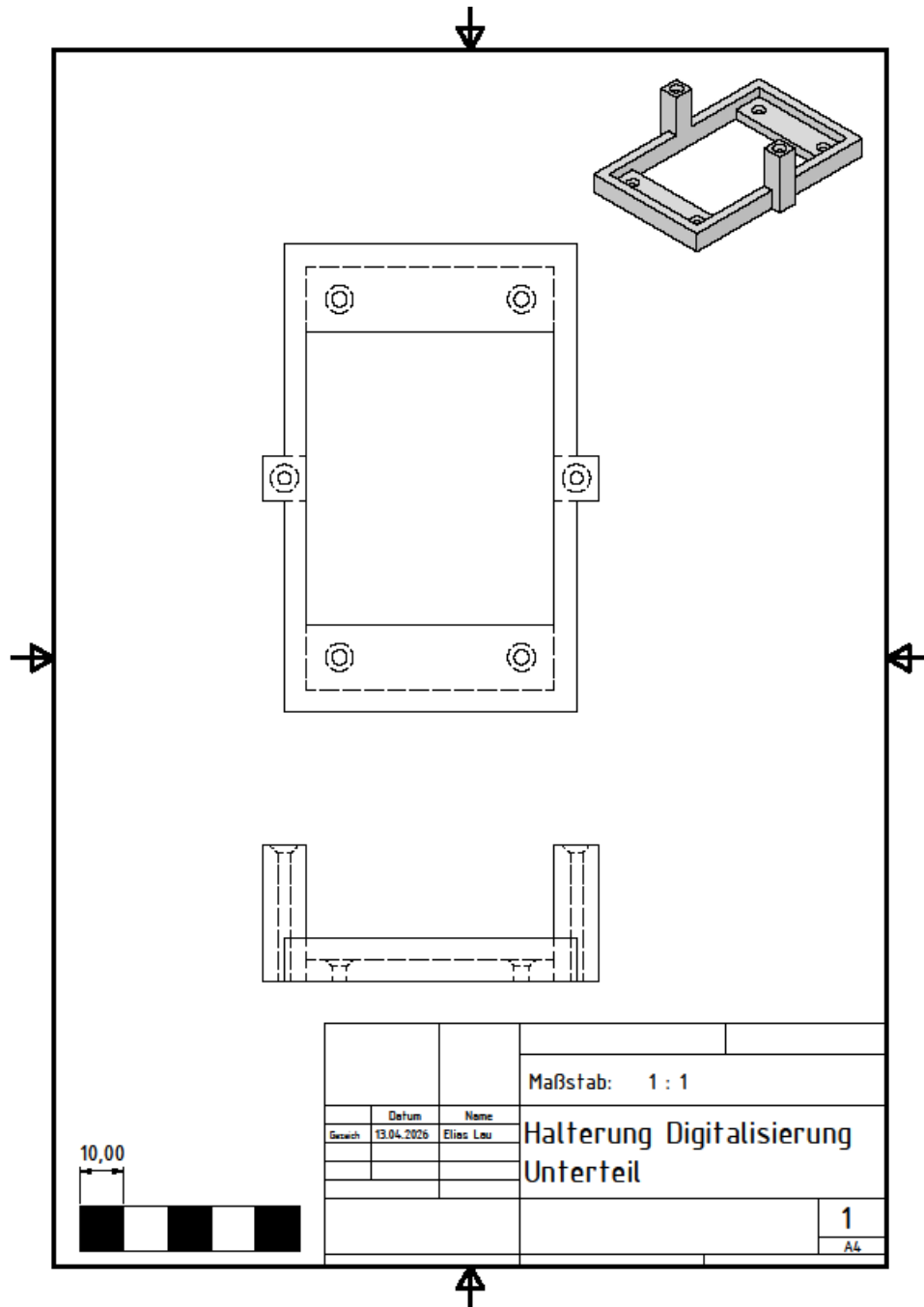
A-Abbildung 17 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Antenne



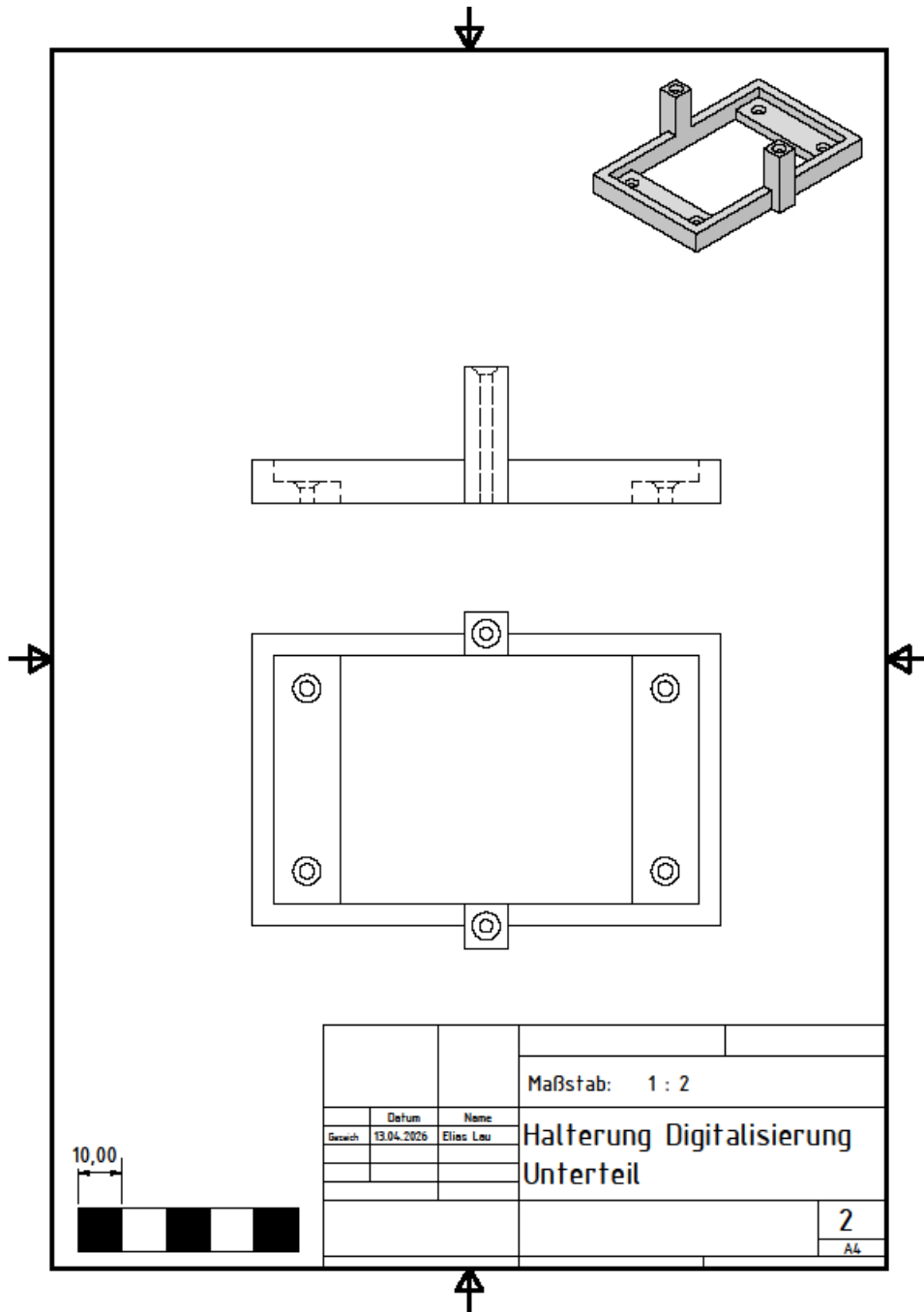
A-Abbildung 18 Zeichnung des Oberteils der Halterung der Empfängereinheit



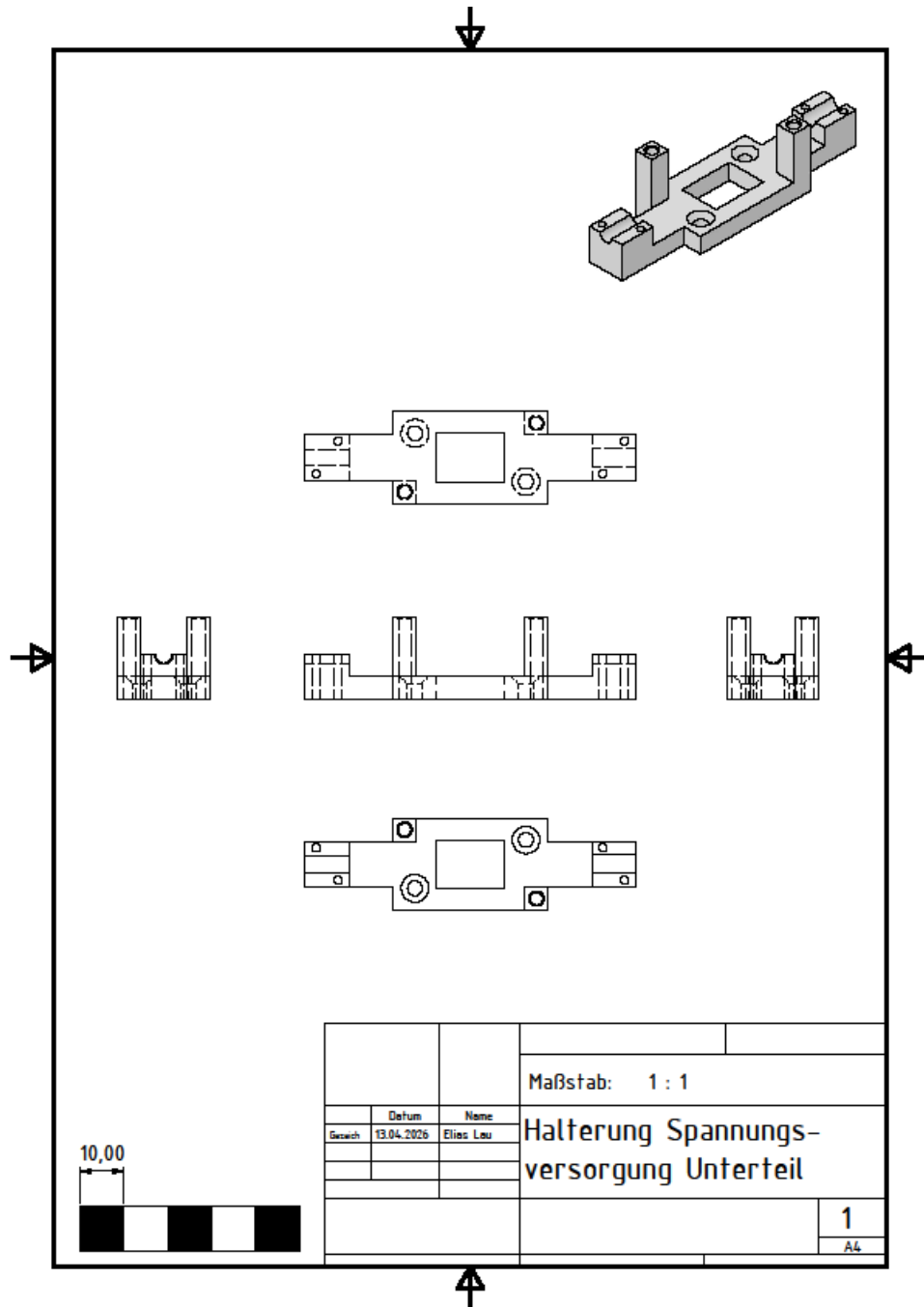
A-Abbildung 19 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Empfängereinheit



A-Abbildung 21 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Digitalisierungseinheit, Seite 1



A-Abbildung 22 Zeichnung des Unterteils der Halterung der Digitalisierungseinheit, Seite 2



A-Abbildung 24 Zeichnung des Unterteils der Halterung des Spannungswandlers

Anhang 7: Feldversuche

Dokumentation der Videoaufzeichnungen

Die Bezeichnung der Aufnahme für den Feldversuch unter Freisichtbedingungen (LOS) lautet:
 Feldversuch_unter_Freisichtbedingungen.mp4

Adäquat dazu lautet die Bezeichnung der Aufnahme für den Feldversuch innerhalb eines Gebäudes:
 Feldversuch_innerhalb_eines_Gebäude.mp4

Beide Aufzeichnungen sind auf dem dieser Arbeit beigefügten elektronischen Medium enthalten. Sie sind unter dem angegebenen Namen unter folgendem Dateipfad zu finden:

... \Diplomarbeit_Lau_Elias\Anhang_7_Feldversuche\

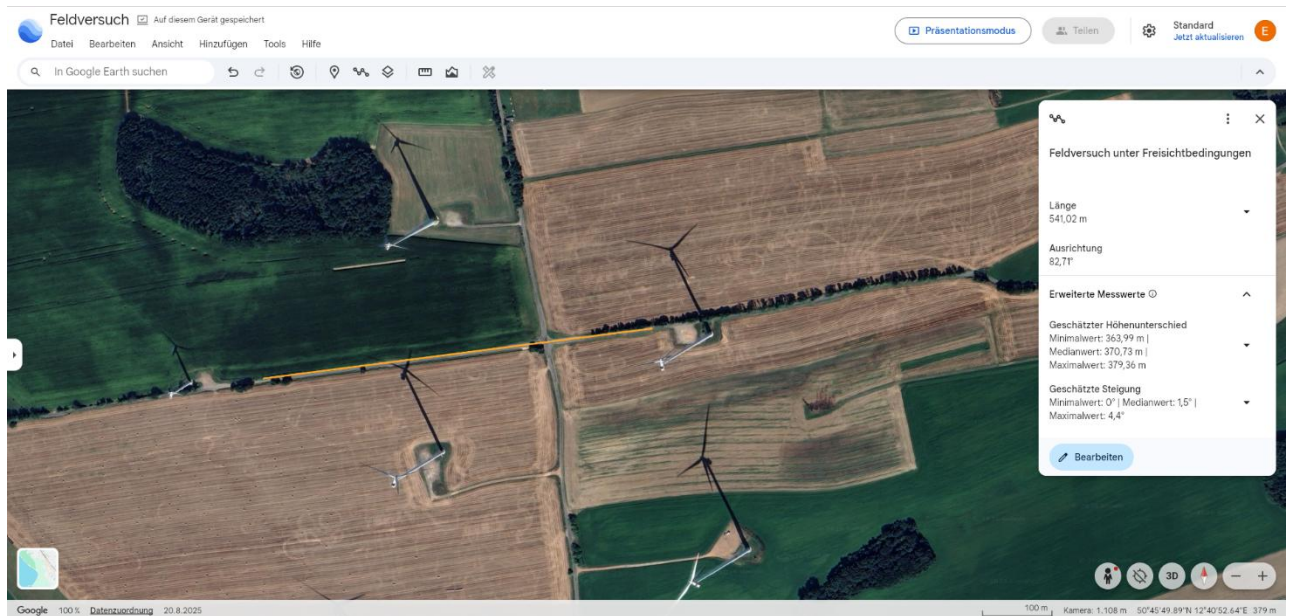
Geografische Zuordnung der Messorte

Zur eindeutigen räumlichen Einordnung der durchgeführten Feldversuche sind die Positionen der Messorte anhand geografischer Koordinaten dokumentiert. Die Angaben dienen der Nachvollziehbarkeit der Versuchsbedingungen sowie der Möglichkeit einer späteren Reproduktion unter vergleichbaren Rahmenbedingungen. Die in A-Tabelle 6 aufgeführten Positionen der Systemkomponenten beziehen sich auf die jeweiligen Standorte zum Zeitpunkt der maximal experimentell bestimmten Übertragungreichweite. Die Position der Senderseite wurde hierbei retrospektiv auf Basis der zugehörigen Videoaufzeichnungen bestimmt, indem der Zeitpunkt des Bildabbruchs herangezogen wurde. Die Position der Empfängerseite wurde hingegen unmittelbar vor Ort ermittelt.

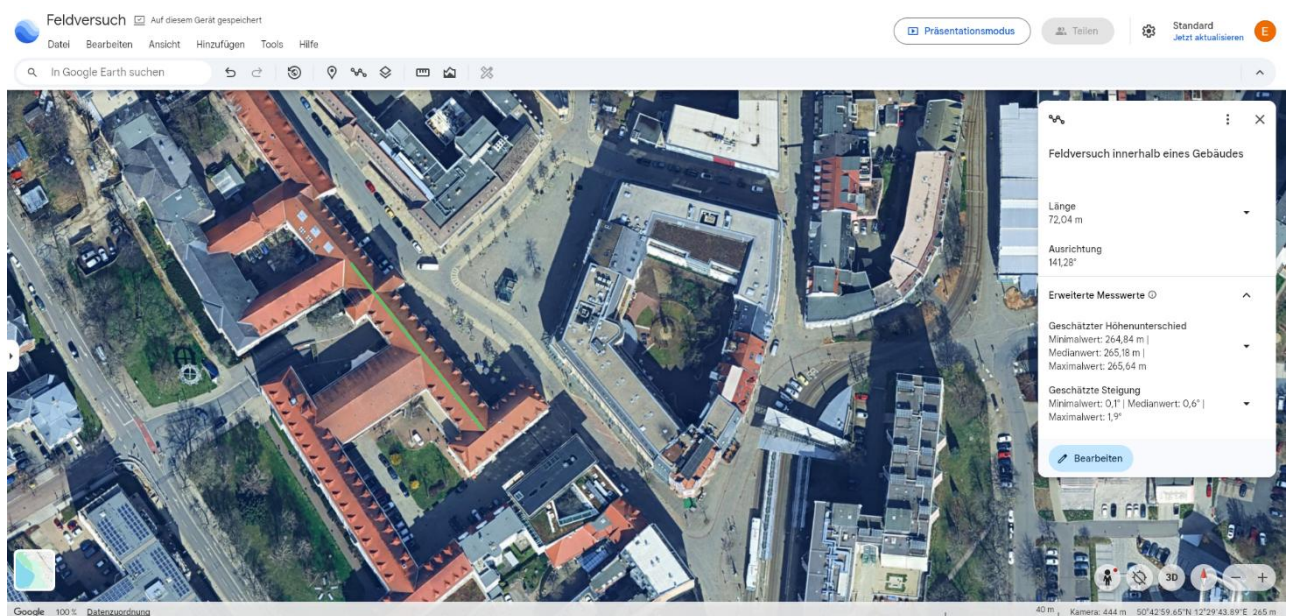
Versuch	Komponente	Breitegrad	Längengrad
Freisichtbedingungen (LOS)	Senderseite	50°45'54.15"N	12°41'12.58"E
	Empfängerseite	50°45'51.93"N	12°40'45.20"E
Innerhalb eines Gebäudes	Senderseite	50°42'58.85"N	12°29'41.69"E
	Empfängerseite	50°42'57.03"N	12°29'43.99"E

A-Tabelle 5 Geografische Koordinaten der Sender- und Empfängerseite bei den Feldversuchen

Zur ergänzenden Veranschaulichung der räumlichen Dimension sind in den folgenden Abbildungen die Messorte auf Basis von Satellitenaufnahmen dargestellt. Die Messungen basieren dabei auf dem integrierten Werkzeug von Google Earth und verdeutlichen insbesondere die räumliche Distanz sowie die Lage der Messpunkte zueinander. Dadurch wird die im Hauptteil beschriebene Versuchssituation zusätzlich visuell nachvollziehbar.



A-Abbildung 25 Darstellung der Funkstrecke zwischen Sender- und Empfangseinheit beim Feldversuch unter Freisichtbedingungen (LOS), in Orange dargestellt



A-Abbildung 26 Darstellung der Funkstrecke zwischen Sender- und Empfangseinheit beim Feldversuch innerhalb eines Gebäudes, in Grün dargestellt

Zeitliche Einordnung der Feldversuche

Die Durchführung der Feldversuche erfolgte dem 07.04.2026 zu den folgenden Uhrzeiten:

Freifeldversuch: 12:30 Uhr

Innenraumversuch: 16:05 Uhr

Die zeitliche Dokumentation dient der vollständigen Nachvollziehbarkeit der Rahmenbedingungen und ermöglicht eine Einordnung möglicher externer Einflüsse, wie beispielsweise Umgebungsbedingungen oder potenzielle Störquellen.