

Wireless Communications Experimente mit labAlive

Masterarbeit

erstellt von

Florian Schäfer

Matrikelnummer: 1173258

Prüfer:

Prof. Dr.–Ing. Erwin Riederer

Eingereicht im November 2021

Fakultät für Elektrotechnik und Technische Informatik

Universität der Bundeswehr München

1 Erklärung zur Masterarbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit

- selbstständig verfasst,
- noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt
- und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, insbesondere keine anderen als die angegebenen Informationen.

Neubiberg, 24.11.2021

Florian Schäfer

2 Inhaltsverzeichnis

1	Erklärung zur Masterarbeit.....	2
2	Inhaltsverzeichnis.....	3
3	Einleitung	5
3.1	Motivation	5
3.2	Thema	6
4	Grundlagen.....	7
4.1	labAlive	7
4.2	Kommunikationstechnik.....	9
4.2.1	Spektrum	9
4.2.2	Der AWGN Kanal	14
5	Neuer Content	17
5.1	Pulsformer, Übertragungsspektrum.....	17
5.1.1	Grundlagen.....	17
5.1.2	Vorgehensweise zur Content Erzeugung	18
5.1.3	Resultate.....	26
5.2	Augendiagramme und Konstellationsdiagramme zu verschiedenen eB/N0 Verhältnissen	29
5.2.1	Grundlagen.....	29
5.2.2	Vorgehensweise zur Content Erzeugung	31
5.2.3	Resultate.....	32
5.3	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	35
5.3.1	Grundlagen.....	35
5.3.2	Vorgehensweise zur Content Erzeugung	35
5.3.3	Resultate.....	38
6	Fazit.....	41
7	Anhang	42
7.1	Quellcode.....	42
7.1.1	Quellcode zur „Tutorial“-Seite der Thematik OFDM.....	42
7.1.2	Quellcode zur „Experiment“-Seite zum Thema OFDM	61
7.1.3	Quellcode zur „Tutorial“-Seite zum Thema Übertragungsspektrum	74
7.1.4	Quellcode zur „Experiment“-Seite zum Thema Übertragungsspektrum	77

7.1.5	Quellcode zur „Illustration“-Seite zum Thema Übertragungsspektrum	78
7.1.6	Quellcode zur „Tutorial“-Seite zum Thema Augendiagramm und Konstellationsdiagramm.....	80
7.1.7	Quellcode zur „Experiment“-Seite zum Thema Augendiagramm und Konstellationsdiagramm.....	83
7.1.8	Quellcode zur „Illustration“-Seite zum Thema Augendiagramm und Konstellationsdiagramm.....	85
7.2	Abbildungsverzeichnis	90
7.3	Literaturverzeichnis	91

3 Einleitung

Unsere moderne Gesellschaft lebt förmlich vom gegenseitigen Austausch und Kommunikation. Ob sicherheitspolitisch oder kommerziell, ob zu Unterhaltungszwecken oder zu Informationszwecken, Datenübermittlung spielt sich in nahezu jedem Bereich des alltäglichen Lebens ab. Beispielsweise erfreuen sich soziale Netzwerke mit ihrer Möglichkeit persönliche Erlebnisse oder Erfolge in Form von Bildern oder Videos mit Freunden oder sogar der ganzen Welt zu teilen, immer größerer Beliebtheit. Anbieter sozialer Medien gehören zu den erfolgreichsten und einflussreichsten Unternehmen der Welt und ermöglichen den Kontakt zwischen nahezu allen Orten des Planeten. Der durch den Aufstieg dieser Technologien und dem vorhandenen Interesse der Menschheit an Kommunikation verursachte Bedarf an zusätzlichen Kapazitäten zur Datenübertragung ist als direkt proportional zum Bedarf an Fachwissen bezüglich der Übertragung von Daten auf der physikalischen Ebene, sei es kabelgebunden oder kabellos, optisch oder elektrisch, anzusehen und ist zu befriedigen.

3.1 Motivation

Um interessierten Menschen abstrakte Sachverhalte, wie sie in der Übertragungstechnik vorkommen, zu vermitteln, bedarf es grundsätzlich einem Labor, das mit enorm kostspieliger Messtechnik ausgestattet ist. Antennen, Signalgeneratoren, Oszilloskope und Spektrum-Analysatoren sind dabei nur einige wenige Beispiele. Da die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten und Effekte allerdings sehr gut erforscht sind und sich gut modellieren lassen, eignet sich in hohem Maße auch eine Simulation zur Vermittlung der Technologie und angewandeter Konzepte. Das von der Universität der Bundeswehr veröffentlichte und vom Institut 5 der Fakultät für Elektrotechnik und Technische Informatik entwickelte Webportal „labAlive“ ermöglicht einen Zugang zu solchen Simulationen und bietet damit einer breiten Masse die Möglichkeit die in der Übertragungstechnik auftretenden Effekte, angewandten Methoden und deren Eigenschaften zu studieren. Die anschauliche und realitätsnahe Umsetzung der Simulation ist dabei vergleichbar mit der Arbeit in einem Labor und schafft so interessierten Menschen einen einfachen Zugang zu einer komplexen Thematik. Diese Plattform weiter

auszubauen und um Inhalte zu ergänzen trägt dazu bei, das vorhandene Wissen zu verbreiten und so die Forschung voranzutreiben.

3.2 Thema

Thema dieser Arbeit war die Erweiterung des bereits erwähnten Internetportals „labAlive“ um neue Inhalte. Dies erforderte eine ausgiebige Literaturrecherche zum Thema der digitalen Kommunikation sowie den gängigen Übertragungsverfahren und angewandten Methoden. Insbesondere sind hier das Übertragungsverfahren OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Impulsformung und dessen Auswirkung auf das Sendespektrum sowie die Abhängigkeit der Bitfehlerwahrscheinlichkeit vom Signal- zu Rausch-Verhältnis zu nennen. Die Ergebnisse waren so aufzubereiten, dass diese optisch ansprechend und didaktisch gut zugänglich als Website veröffentlicht werden können. Ferner war auch aussagekräftiges Bildmaterial zur Veranschaulichung der Thematik zu erzeugen und neben einer Erklärung eines Themengebiets eine Anleitung für die Nutzer des Webportals zur Durchführung von zum Themengebiet passenden Experimenten zu verfassen. Dazu war eine Einarbeitung in HTML und in die verwendete Entwicklungsumgebung Eclipse, welche über das gesamte Projekt „labAlive“ verwendet wird, notwendig. Ein weiterer Bestandteil der Arbeit war die Erstellung von Handlungsanweisungen, die zukünftigen Produzenten von neuen Inhalten für das Webportal den Einstieg erleichtern sollen. Die Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche sowie der daraus geschaffene neue Inhalt für das Webportal und die genannten Handlungsanweisungen werden im Folgenden dargelegt.

4 Grundlagen

In diesem Kapitel soll das Webportal „labAlive“ in groben Zügen vorgestellt und einige Grundlagen zur digitalen Kommunikation erläutert werden.

4.1 labAlive

Hinter dem Kunstwort „labAlive“ verbirgt sich ein von der Universität der Bundeswehr veröffentlichtes und vom Institut 5 der Fakultät für Elektrotechnik und Technische Informatik erschaffenes Internetportal.



Abbildung 1 Startseite des Webportals „labAlive“ (7)

Das Ziel der Entwickler von „labAlive“ ist es, Studierenden der Kommunikationstechnik und ähnlichen Disziplinen sowie Interessierten eine Möglichkeit zu schaffen, kommunikationstechnische Experimente durchzuführen, für die normalerweise eine aufwändige Laborumgebung mit teurer Hardware wie Signalgeneratoren, Messgeräte und Übertragungstechnik nötig ist. Dies wird unter Ausnutzung der Tatsache, dass die physikalischen Grundlagen und auftretenden Effekte der Kommunikationstechnik sehr gut

erforscht sind und somit eine Modellierung der Vorgänge realisierbar ist, bewerkstelligt. „labAlive“ stellt eine Vielzahl von Simulationsprogrammen, die von den Nutzern ohne größere Hindernisse direkt online von der Website aus ausgeführt werden können, zur Verfügung. Die so abgedeckten Themengebiete erstrecken sich dabei über eine Vielzahl von Übertragungsverfahren, wie analoge Übertragungsverfahren, digitale Übertragungsverfahren oder fortgeschrittene Technologien wie Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

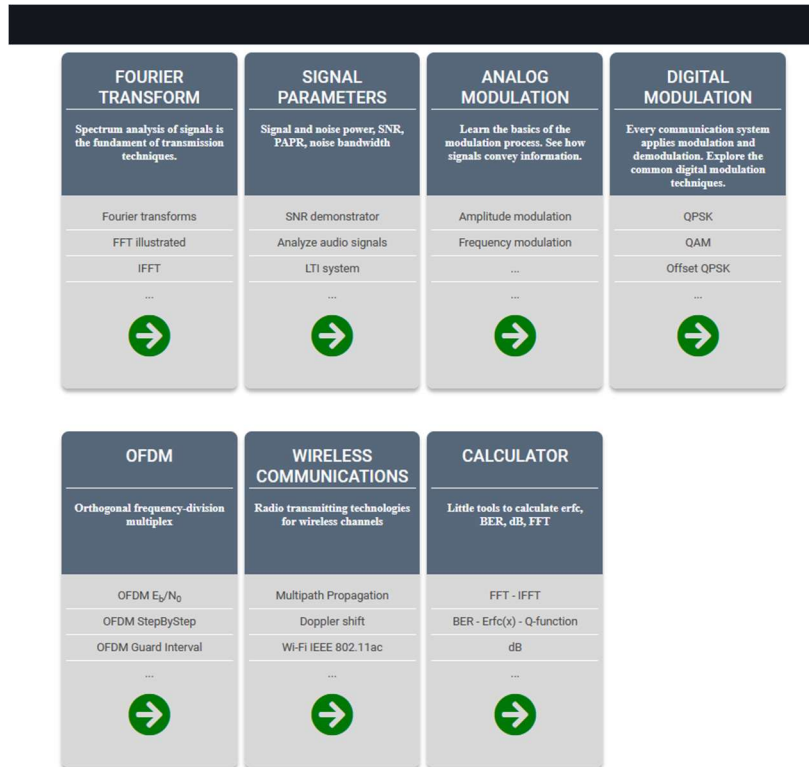


Abbildung 2 Themengebietsauswahl im Webportal „labAlive“ (7)

Die jeweiligen Simulationsprogramme sind im Zentralen durch ein Blockdiagramm, das alle Komponenten des entsprechenden Systems beinhaltet, realisiert. Dieses Blockdiagramm fungiert zudem als Schnittstelle zwischen dem Nutzer und der Simulation. So ermöglicht das Blockdiagramm als Bedienfeld der Simulation die Veränderung von Systemparametern oder die Darstellung von verschiedenen Messgeräten wie Oszilloskopen oder Spektrum-Analysatoren zur Visualisierung der Signale an beliebigen Messstellen. Die Messergebnisse entsprechen dabei, durch die durchgeführte Modellierung der realen Systeme und deren mathematische Simulation, denen, die eine Messung an einem realen System hervorbringen würde. Auch die Einstellmöglichkeiten an den virtuellen Messgeräten sind denen der realen Messinstrumente nachempfunden, sodass die virtuellen Laborversuche tatsächlichen

Versuchsaufbauten in ihrem Verhalten, dem didaktischen Mehrwert sowie den Anforderungen an den Nutzer in nichts nachstehen. Ferner ist der notwendige Materialaufwand, im Sinne des Vorhandenseins der entsprechenden Technik, sowie der notwendige Zeitaufwand für eine entsprechende Ausbildung stark reduziert, da kein zeitintensiver Aufbau von Versuchssystemen vorgenommen werden muss.

4.2 Kommunikationstechnik

Der Begriff „Kommunikationstechnik“ umspannt ein weites Feld an wissenschaftlichen Disziplinen und Technologien. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kommunikationstechnik im Kontext des Webportals „labAlive“, sprich der technischen Seite der Übermittlung von Daten und Informationen, beleuchtet. Die im Folgenden, sehr oberflächlich erläuterten Grundlagen sind für das Verständnis der auf der Web-Plattform angebotenen Inhalte, und damit für die Ausnutzung des vollen Funktionsumfangs der Simulations-Applikationen, unerlässlich.

4.2.1 Spektrum

Eine der essentiellsten Grundlagen der Telekommunikation ist das Verständnis über den Zusammenhang zwischen Zeitsignalen und dem dazugehörigen Amplitudenspektrum. Wird die mathematische Modellierung betrachtet, so lässt sich mithilfe der Fourier-Transformation jedes beliebige Zeitsignal in ein Spektralsignal transformieren und umgekehrt. Da Zeitsignale beliebiger Form als Summe von cosinusförmigen und sinusförmigen Schwingungen verschiedener Frequenz und Amplitude zu verstehen sind, entspricht ein Amplitudenspektrum der Darstellung dieser im Zeitsignal vorhandenen Schwingungen. Folgende Abbildung zeigt ein reines sinusförmiges Zeitsignal und das dazugehörige Spektrum. Die Abbildungen wurden mithilfe einer „labAlive“ Simulation generiert.

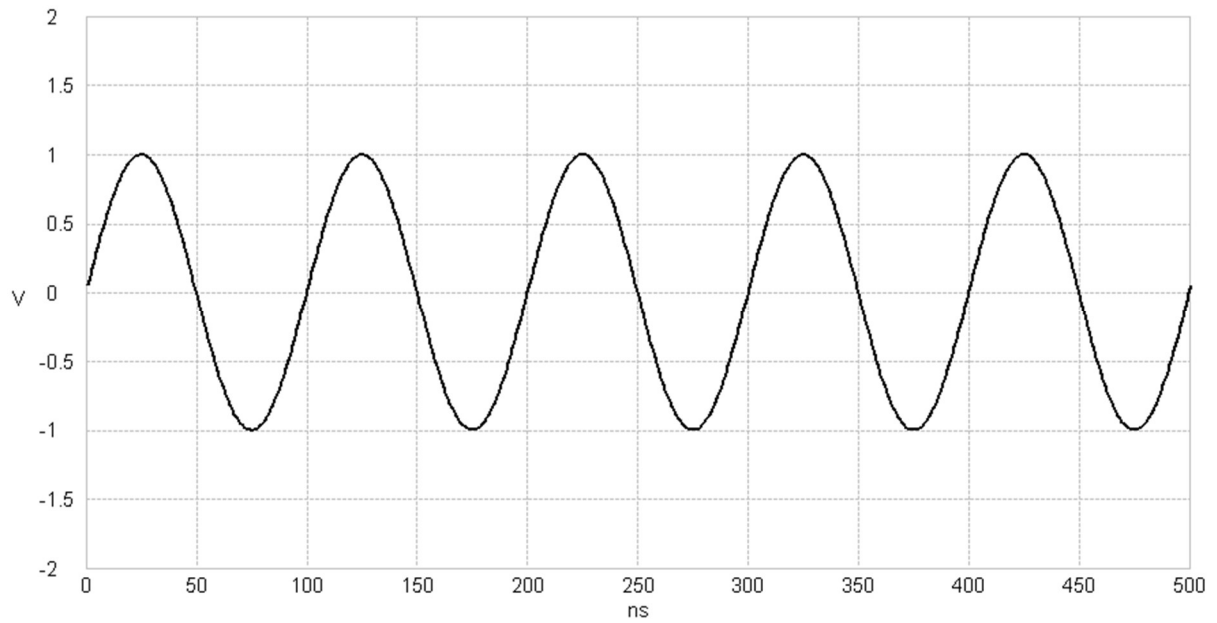


Abbildung 3 Sinussignal mit einer Frequenz von 10 MHz

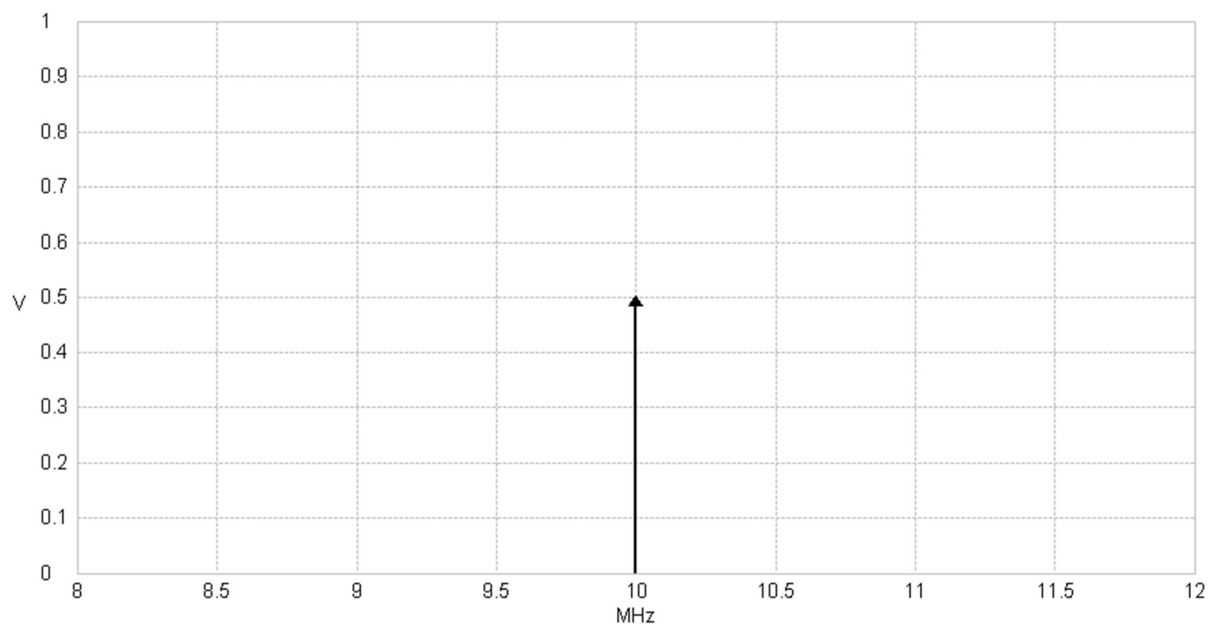


Abbildung 4 Spektrum eines Sinussignals mit einer Frequenz von 10 MHz

Eine Sinusfunktion im Zeitbereich mit einer Frequenz von 10 MHz und einer Amplitude von 1 V weist im positiven Spektralbereich lediglich einen Dirac an der Stelle 10 MHz auf, da dieses Signal ausschließlich aus eben jenem Frequenzanteil besteht.

Wird dem Signal eine weitere Sinusschwingung mit der Frequenz 30 MHz und einer Amplitude von 0,5 V hinzuaddiert, ergeben sich im Zeit- und Spektralbereich folgende Graphen als Ergebnisse der entsprechenden Messungen.

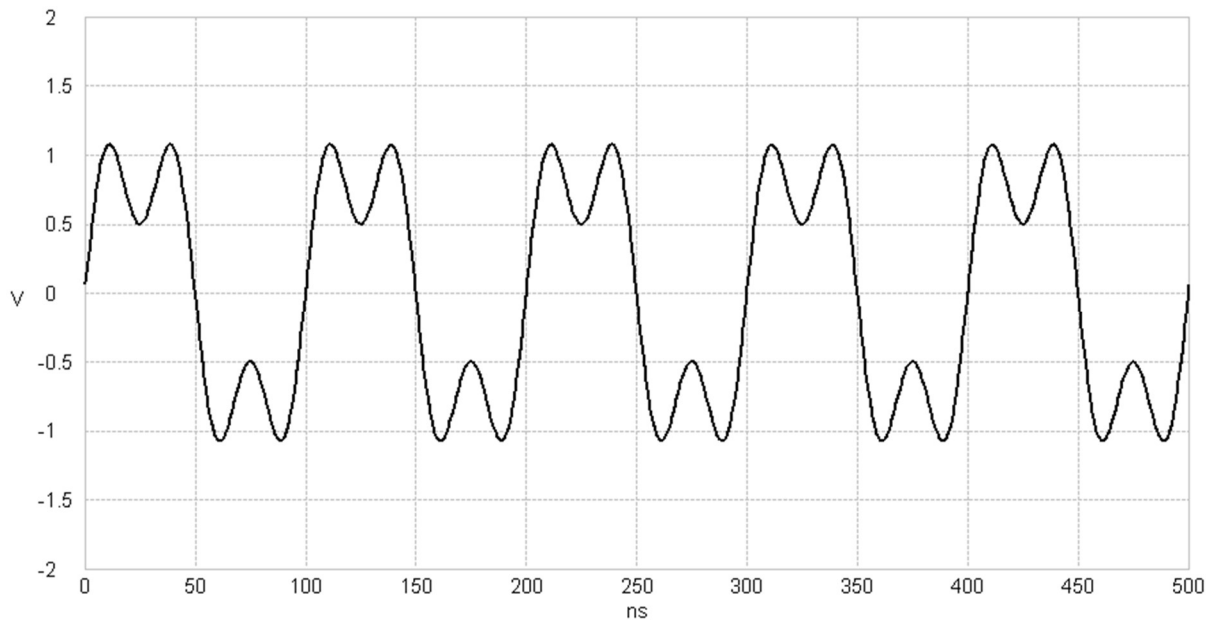


Abbildung 5 Resultat einer Addition von verschiedenen Sinusschwingung

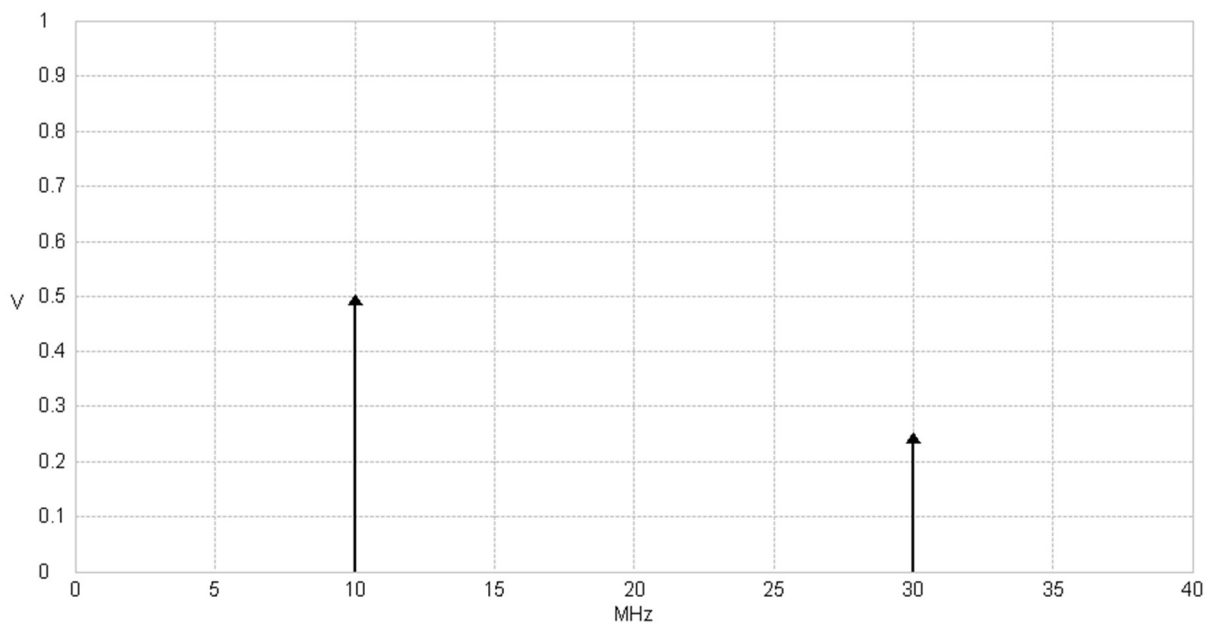


Abbildung 6 Spektrum eines Signals mit zwei Sinusanteilen

Das vorhandene Signal veranschaulicht bei der Betrachtung der Spektral-Analyse die Zusammensetzung aus den verschiedenen bekannten Frequenzanteilen verschiedener Amplituden.

Wird eine solche Messung mit dreieckförmigen oder rechteckförmigen Zeitsignalen durchgeführt ergeben sich folgende Graphen für Zeit- und Frequenzbereich.

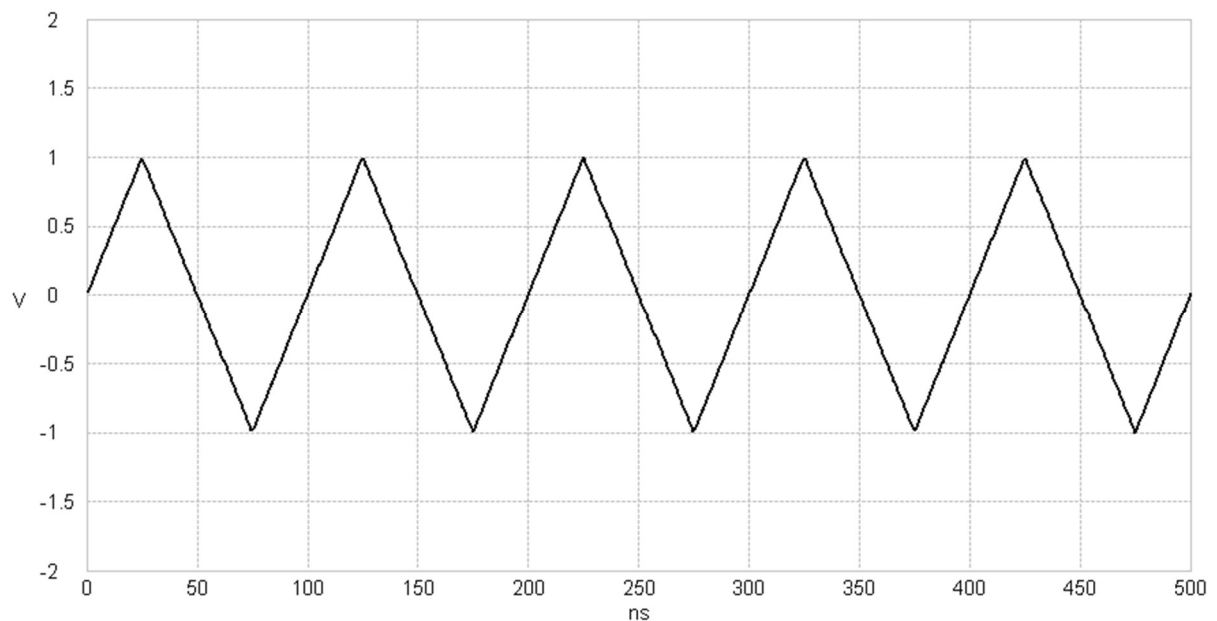


Abbildung 7 Dreieckförmiges Signal mit einer Frequenz von 10 MHz

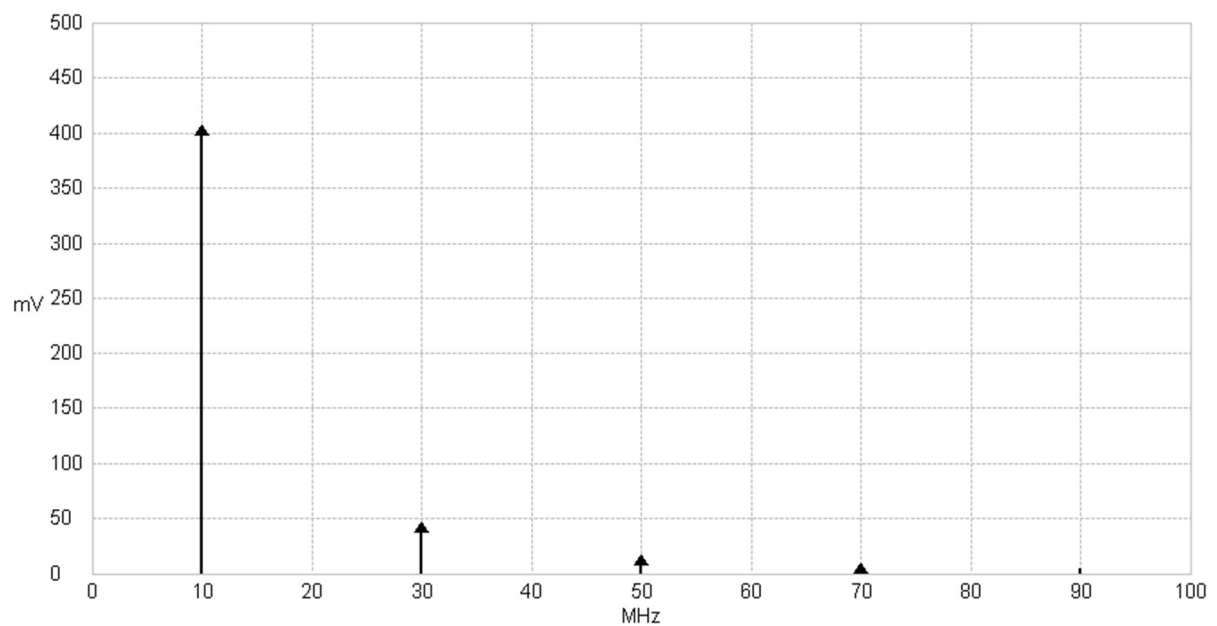


Abbildung 8 Spektrum eines dreieckförmigen Signals

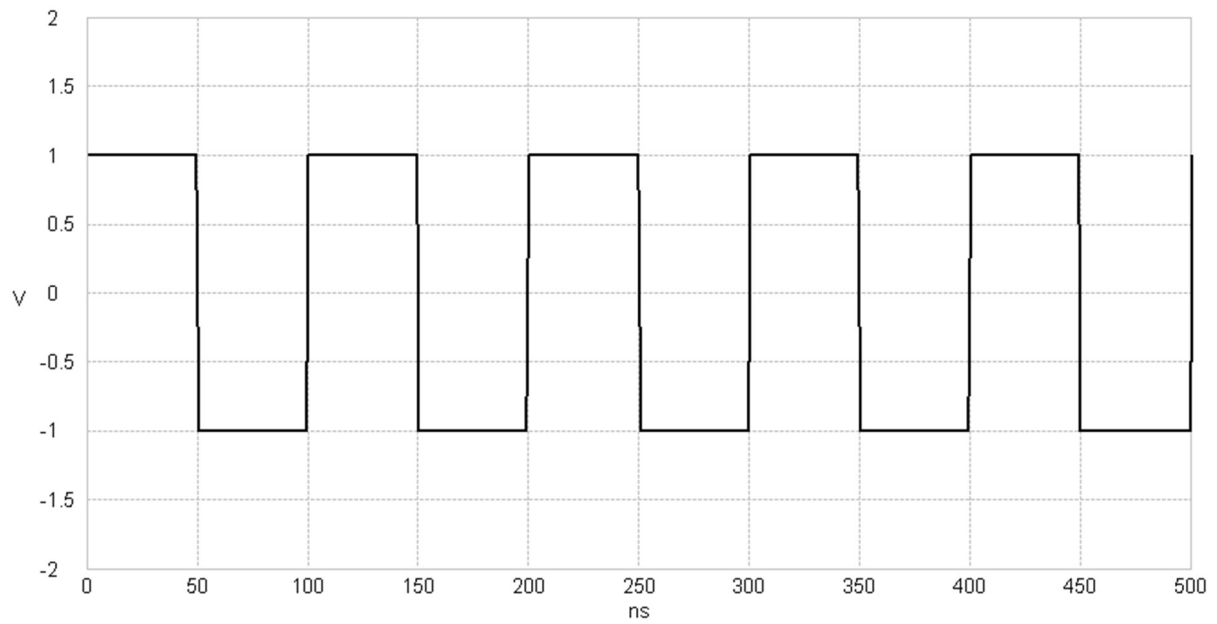


Abbildung 9 Rechteckförmiges Signal mit einer Frequenz von 10 MHz

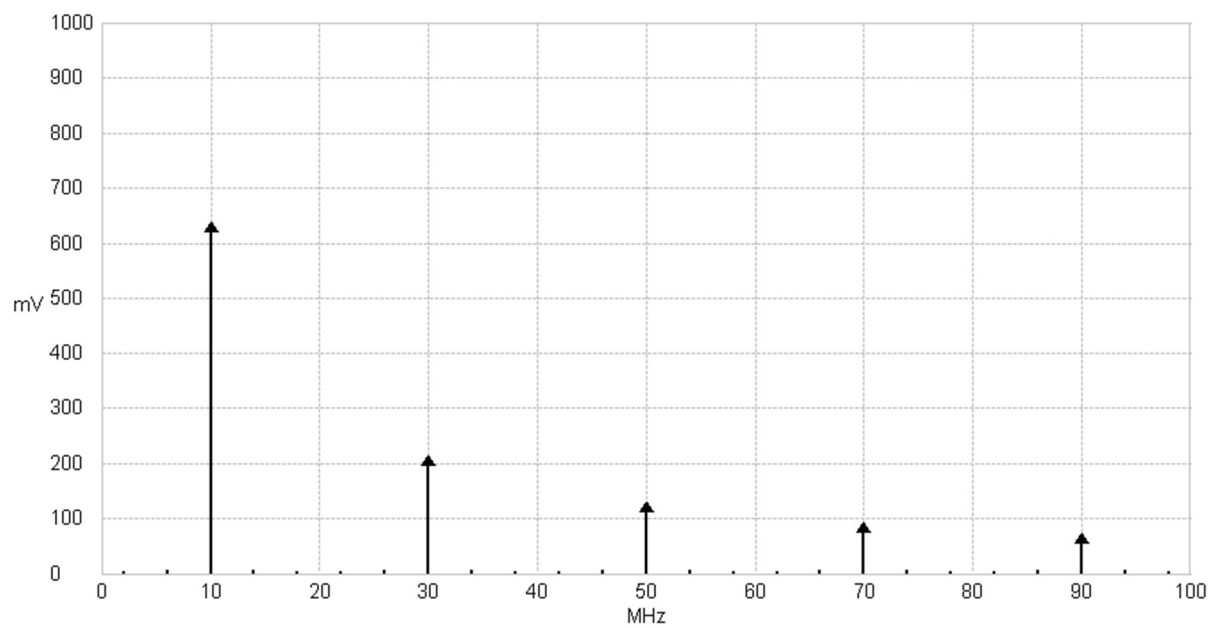


Abbildung 10 Spektrum eines rechteckförmigen Signals

Diese Messung verdeutlicht, dass Signale, die im Zeitbereich steile Signalflanken und scharfe Kanten aufweisen, über ein deutlich breiteres Spektrum verfügen, also aus Signalanteilen mit enorm hohen Frequenzen zusammengesetzt sind.

4.2.2 Der AWGN Kanal

Werden Nachrichten im Sinne der Telekommunikation übermittelt so müssen diese stets von einem Sender zu einem Empfänger gelangen. Der Raum, der sich zwischen den beiden Parteien befindet, wird als Kanal bezeichnet. Dieser kann nahezu beliebig beschaffen sein. Jedoch wirken sich bei der Übermittlung von Nachrichten Umwelteinflüsse auf die im Kanal befindliche Nachricht aus und verändern diese. Ein weit verbreitetes und häufig zur Modellierung dieser Effekte verwendetes Modell ist der AWGN-Kanal- Die Abkürzung steht hierbei für „Additive White Gaussian Noise“. Die Umwelteinflüsse werden also als dem Sendesignal hinzuaddiertem, weißem, gaußverteiletem Rauschen modelliert. (1) Folgendes Blockdiagramm veranschaulicht die Vorgehensweise der Modellierung. Links ist der Sendeteil, rechts der Empfangsteil der Übertragungsstrecke dargestellt. Der Kanal (blau) ist als AWGN-Kanal modelliert.

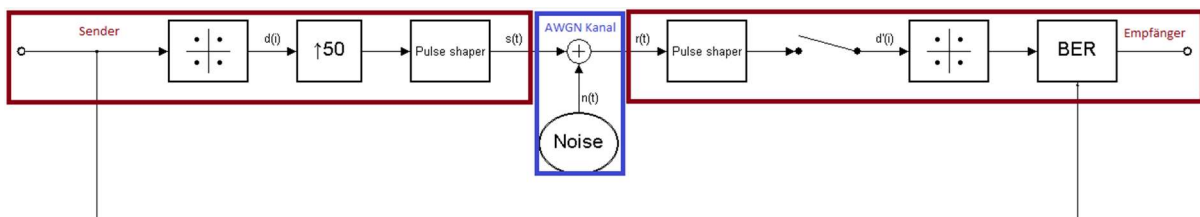


Abbildung 11 Blockdiagramm einer Sender- Empfängerstrecke mit AWGN Kanal

Das vom Sendeteil der Übertragung erzeugte Nachrichtensignal wird für ein erklärendes Beispiel als folgende Folge von positiven Sinushalbwellen angenommen.

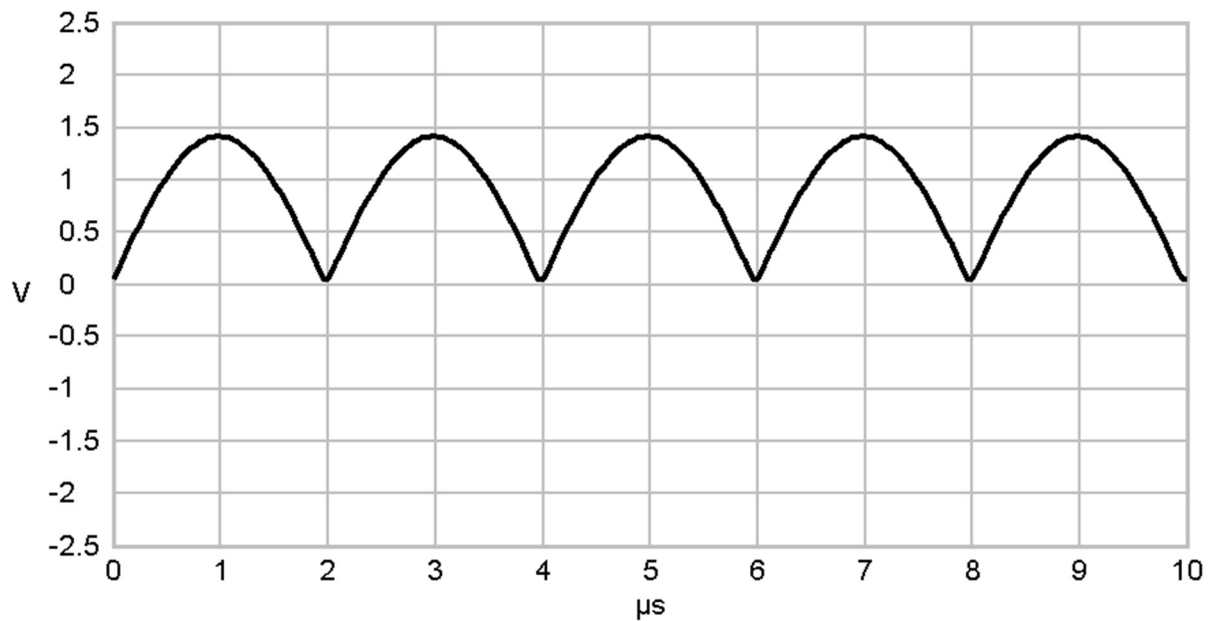


Abbildung 12 Beispielhaftes Sendesignal ohne Rauschen

Der Begriff „weißes Rauschen“ bezieht sich auf die im Rauschen enthaltenen Frequenzanteile. Analog zum im weißen Licht, in dem alle Farbanteile, also Frequenzanteile des sichtbaren Lichts enthalten sind, so weißt weißes Rauschen ein konstantes Leistungsdichtespektrum auf. Die Gaußverteilung betrifft die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Störeinflüssen in Abhängigkeit von der Amplitude der Störung. Rauschanteile mit kleinen Amplituden treten dabei häufiger auf als solche mit enorm hohen Spannungswerten. Im Folgenden ist ein weißes, Gaußverteiltes Störsignal über der Zeit dargestellt. (1)

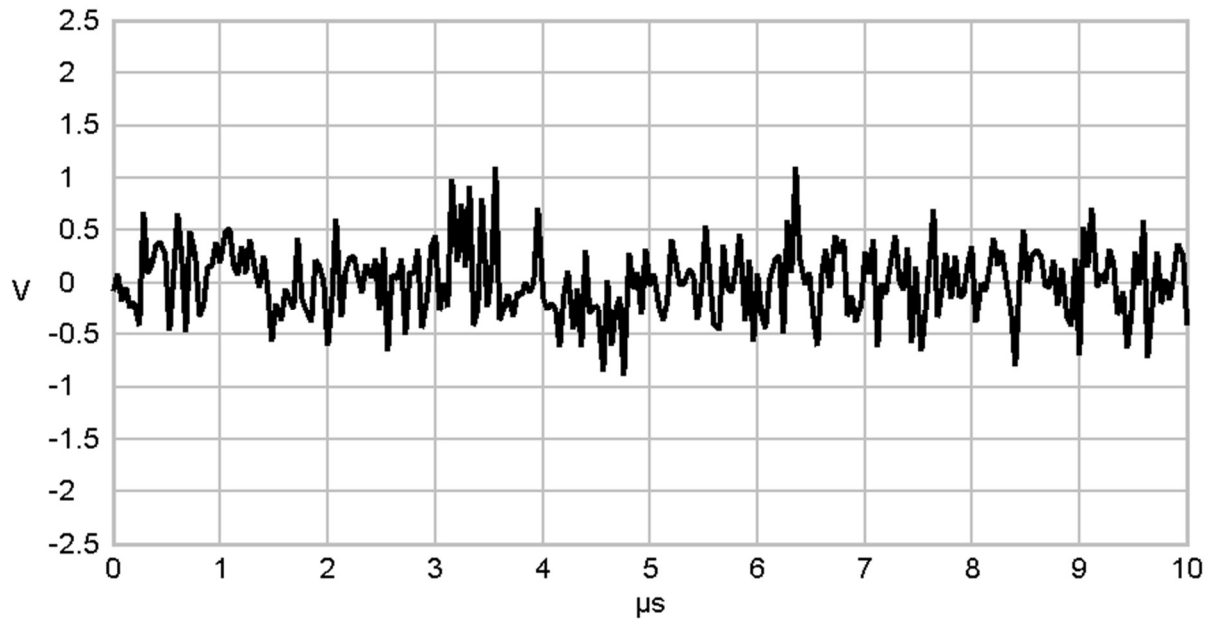


Abbildung 13 Weißes, gaußverteiltes Rauschsignal

Werden Sendesignal und Störsignal gemäß dem Modell des AWGN-Kanals addiert, so ergibt sich für dieses Beispiel das folgende Signal über der Zeit.

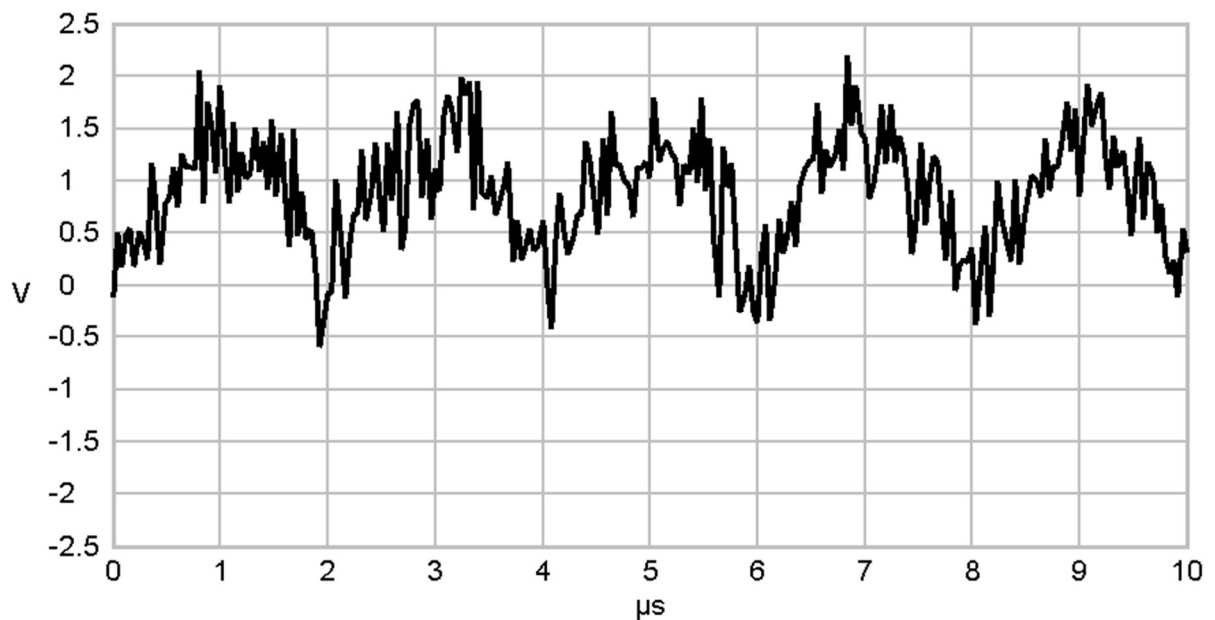


Abbildung 14 Sendesignal nach Passage des AWGN-Kanalmodells

5 Neuer Content

Dieses Kapitel widmet sich dem im Rahmen der Arbeit neu angefertigten Content für das Webportal „labAlive“. Dabei wird im Folgenden sowohl auf das Thema des erzeugten Inhalts als auch auf die für das Verständnis des Sachgebiets notwendigen Grundlagen eingegangen. Ferner wird die Vorgehensweise für die Erzeugung von Inhalten, sprich Parameter von Simulationen, die für die Anfertigung von veranschaulichendem Bildmaterial genutzt wurden, und die tatsächliche Umsetzung in HTML eingegangen. Der Webseiteninhalt wurde in englischer Sprache verfasst, um ein möglichst breites Publikum anzusprechen.

5.1 Pulsformer, Übertragungsspektrum

Der neu erzeugte Inhalt zum Thema Pulsformung und den Auswirkungen dessen auf das Übertragungsspektrum ist in seinem Erscheinungsbild auf der Website in drei Abschnitte gegliedert. Im Detail wird dem Nutzer zunächst der Abschnitt „Tutorial“ präsentiert, in welchem die Grundlagen und die theoretischen Aspekte des Themas erklärt und veranschaulicht werden. Im zweiten, „Experiment“ betitelten Abschnitt wird dem Nutzer der Zugang zu jenem Simulationsprogramm gewährt, welches ihm das Themengebiet durch die Möglichkeit des eigenständigen Experimentierens näherbringen soll. Ferner ist hier eine Anleitung für das Experiment vorhanden, sodass auch der weniger versierte Nutzer aussagekräftige Ergebnisse erlangt.

5.1.1 Grundlagen

Digitale Signale können als Folge von rechteckförmigen Impulsen verstanden werden. Wie im Grundlagenkapitel bereits erläutert, weisen solche, im Zeitbereich scharfkantigen Signale, ein unendlich breites Spektrum im Frequenzbereich auf. Jedoch kann ein solches Signal offensichtlich über beispielsweise ein Kupferkabel, welches bekanntermaßen einen

Tiefpasscharakter aufweist, übertragen und fehlerfrei empfangen werden. Dies zeigt, dass bei der Übertragung eines digitalen Signals nicht die ursprüngliche Signalform die Information beinhaltet. Es reicht bei dieser Technologie aus, wenn bei der Abtastung im Empfänger korrekt zwischen den vorhandenen Signalzuständen unterschieden wird. (2) Diese Eigenschaft kann bei der Übertragung im Frequenz-Multiplex-Verfahren genutzt werden. Dieses Verfahren beruht darauf, dass mehrere Datenströme auf verschiedenen Trägerfrequenzen gleichzeitig auf demselben Medium übertragen werden. Dazu ist es unabdingbar, dass jeder einzelne Datenstrom im Frequenzbereich eine ihm zugewiesene Bandbreite nicht überschreitet. Dies kann erreicht werden, indem die digitalen Datensignale tiefpassgefiltert werden. Es kommt also zum Einsatz von Sendefiltern, die die Impulsform verändern. Eine Tiefpassfilterung muss jedoch so durchgeführt werden, dass die einzelnen Symbole, die dadurch im Zeitbereich aufgrund der fehlenden hochfrequenten Signalanteile verlängert werden, die vorherigen und nachfolgenden Symbole nicht unzulässig stark beeinflussen, es also nicht zur sogenannten Intersymbol Interferenz (ISI) kommt.

5.1.2 Vorgehensweise zur Content Erzeugung

Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs von Übertragungsimpulsform und Übertragungsspektrum wurde eine bereits vorhandene Simulation so umprogrammiert, dass diese eine digitale, QPSK-modulierte Basisbandübertragung über einen AWGN-Kanal mit Sende- und Empfangsfilter modelliert. Diese Simulation ist, zum besseren Verständnis durch den Anwender, auf das Wesentliche reduziert, stellt aber die durch dieses Experiment zu vermittelnden Effekte ohne Einschränkungen dar. Die folgende Abbildung zeigt den Programmcode der verwendeten Simulation.

```

package de.labAlive.wiring.wirelessCommunications.modulation;

import de.labAlive.system.siso.modem.EquivalentBasebandModem;
// import static de.labAlive.config.ConfigModel.*;
import de.labAlive.system.siso.modem.Modem;
import de.labAlive.system.siso.modem.VoidModem;
import de.labAlive.system.siso.modem.builder.ModemBuilder;
import de.labAlive.system.siso.modem.builder.rates.RfModemRates;
import de.labAlive.system.siso.modem.symbolMapping.QamMapping;
import static de.labAlive.core.config.CoreConfigModel.gui;
import static de.labAlive.core.config.CoreConfigModel.simu;

// Referenced in online experiment
public class QpskBerEquivalentBasebandWoPulseShaping2 extends QpskBer {
    private static final long serialVersionUID = 1007L;

    @Override
    public void configure() {
        gui.wiringName = "QPSK BER (equivalent baseband without pulse
shaping)";
        simu.stepsPerSecond = 1e9;
        // simu.signalSynchronizer = new TripleQueueSignalSynchronizer(100,
5000);
        configureDefaultXyMeter();
    }

    @Override
    protected Modem getModem() {
        ModemBuilder modemBuilder = new ModemBuilder();
        modemBuilder.rates(RfModemRates.createDefaultRates()).transmissi
onPower(1).samplesPerBit(50).symbol(newQamMapping()).modem(new
EquivalentBasebandModem());
        return modemBuilder.build();
    }

    // @Override
    // public void adjustMeasures() {
    //     modem.symbol().mapping().getOutWire().set(signalLogging.show());
    // }
}

```

Abbildung 15 Programmcode der für die Messungen verwendeten Simulation

Der Programmbefehl „configureDefaultMeter()“ dient dem Zweck, für Messgeräte ein Layout festzulegen, welches zu optisch ansprechenden Messkurven und Grafiken führt.

Mittels des simulationsinternen Spektrumanalysators wurden Messungen des Übertragungsspektrums mit verschiedenen Pulsformern durchgeführt. Aufgrund der Übertragung im Basisband waren für die Erzeugung aussagekräftiger Messergebnisse Folgende

Einstellungen am Spektrumanalysator vorzunehmen. Die Startfrequenz war zur Darstellung des beidseitigen Übertragungsspektrums auf -2,5 MHz, und zur Verbesserung der Auflösung der Messwerte die Darstellung im Frequenzbereich auf 0,5 MHz/div einzustellen. Um die simulationsinterne Speicherfunktion nutzen zu können, wurde für die Darstellung des Fensters die Einstellung „Frame – full 890 px“ gewählt. Die so erzeugten Graphen wurden zur Veranschaulichung der behandelten Thematik teilweise direkt in die Website implementiert, teilweise, wie im Folgenden beschrieben, weiter verarbeitet. Folgende Abbildung zeigt ein beispielhaftes Messergebnis, welches so auch direkt im Teil „Tutorial“ implementiert wurde.

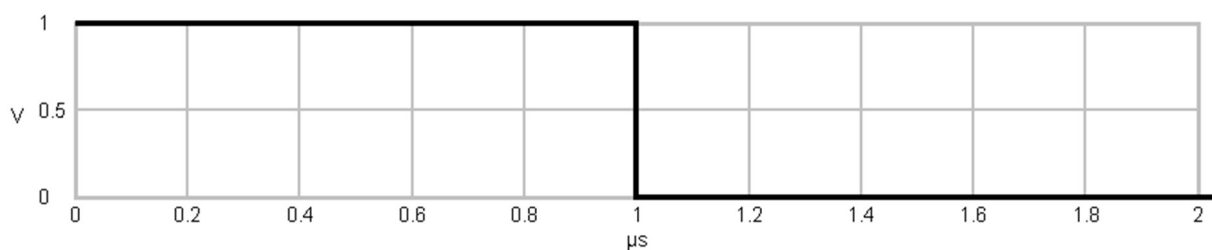


Abbildung 16 Quellsignal, gemessen mit dem Oszilloskop, gesichert mit der simulationsinternen Speicherfunktion

Um die Website optisch ansprechend und damit didaktisch wertvoll zu gestalten, wurde auf einen linearen Aufbau im Abschnitt „Tutorial“ verzichtet. Stattdessen werden die Messergebnisse in Form einer Slideshow präsentiert. Dies bietet zum einen den Vorteil, dass die Seite drastisch verkürzt, und damit übersichtlicher wird, und zum anderen sind die Unterschiede, die die jeweiligen Messergebnisse aufweisen, für den Nutzer leichter und deutlicher erkennbar. Um diese möglichst kompakte Form der Informationsdarstellung noch weiter zu intensivieren, wurde für die genannte Slideshow nicht auf einzelne Graphen, die präsentiert werden, zurückgegriffen, sondern für jedes darzustellende Filter eine Montage, die alle, den Sachverhalt veranschaulichenden, Messungen beinhaltet, erstellt. Dazu kam das kostenfreie Bildbearbeitungstool „GIMP“ zum Einsatz. Folgend ist exemplarisch eine Bildmontage, wie es in der genannten Slideshow verwendet wird, dargestellt.

Rectangle pulse shaper

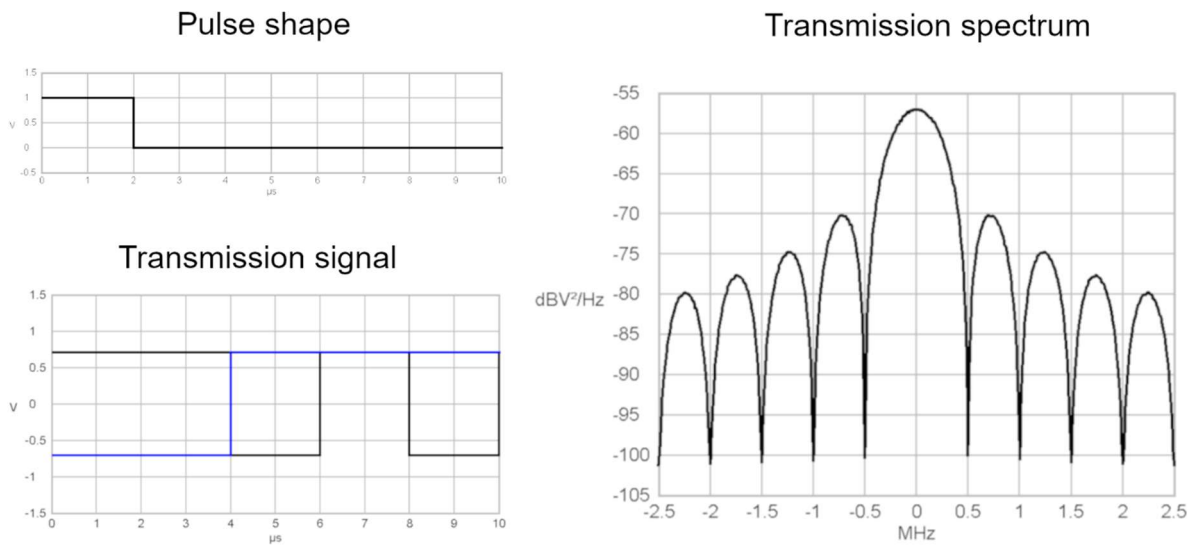


Abbildung 17 Slideshow-Montage für rechteckförmige Signale

Zur Implementierung der Slideshow auf der Website wird Folgende Codekonstruktion genutzt:

```
<div class="slideshow">
        
  <button class="slideshow-button-left" onclick="plusSlides(-1,
0)">&#10094;</button>
  <button class="slideshow-button-right" onclick="plusSlides(1,
0)">&#10095;</button>
</div>
```

```
<script>
var slideIndex = [ 1, 1, 1 ];
var slideId = [ "mySlides1" ]
showSlides(1, 0);
showSlides(1, 1);
showSlides(1, 2);

function plusSlides(n, no) {
    showSlides(slideIndex[no] += n, no);
}

function showSlides(n, no) {
    var i;
    var x = document.getElementsByClassName(slideId[no]);
    if (n > x.length) {
        slideIndex[no] = 1
    }
    if (n < 1) {
        slideIndex[no] = x.length
    }
    for (i = 0; i < x.length; i++) {
        x[i].style.display = "none";
    }
    x[slideIndex[no] - 1].style.display = "block";
}
</script>
```

Abbildung 18 Quellcode der Slideshow

Hierbei ist zu beachten, dass der Codeteil, der sich innerhalb der `<div>`-Markern befindet, an der jeweiligen Stelle im Seitenquelltext vorhanden sein muss, an dem er angezeigt werden soll. Die dazugehörigen Skripte, erkennbar an den `<script>`-Markern können sich am Ende des Seitenquelltextes befinden.

Der Abschnitt „Experiment“ wurde so gestaltet, dass dem Nutzer der Einstieg und die Nutzung der Simulation möglichst einfach und intuitiv ermöglicht wird. Zwar hätte die Möglichkeit bestanden, dem Anwender beim Start der Simulation bereits alle benötigten Instrumente bereits korrekt parametrisiert darzustellen, jedoch wurde darauf aus didaktischen Gründen gezielt verzichtet. Stattdessen beinhaltet die Website „Experiment“ Anweisungen für den Nutzer, wie zu verfahren ist, um die gewünschten Messergebnisse zu erlangen. Dies soll zum Verständnis über die durchgeführten Messungen beitragen. Als Bestätigung für den Anwender, dass die Anweisungen korrekt befolgt wurden, sind auf der Seite Screenshots jener Fenster zu sehen,

die der Anwender selbst ebenso vor sich hat, wenn er die Simulation gemäß der Anleitung bedient. Diese Screenshots wurden mithilfe des Tools „Snipping Tool“ von Microsoft erstellt, welches als Teil des Betriebssystems auf jedem aktuellen Windows-Rechner vorhanden ist.

Der Abschnitt „Illustration“ beinhaltet ein Sammelsurium von Messergebnissen, wie sie mit der hier verwendeten Simulation erstellt werden können und dient als Anschauungsmaterial für Besucher der Website und als Inspiration zur Nachahmung für Nutzer der Simulation. Das Bildmaterial wurde im Abschnitt „Illustration“ tabellarisch zusammengefasst. Die HTML-Umsetzung einer solchen tabellarischen Darstellung wird im Folgenden erläutert.

```

<div class="table-wrapper">
  <table class="noborder">
    <tr>
      <td style="vertical-align: top; width: 50%">
        <div class="figure-half">
          
          </div>
          <div class="caption-center">Basic pulse created by
            a rectangle pulseformer</div>
        </td>
        <td style="vertical-align: top">
          <div class="figure-half">
            
            </div>
            <div class="caption-center">Power-density spectrum of a
              rectangle shaped Symbol</div>
          </td>
        </tr>
        <tr>
          <td style="vertical-align: top; width: 50%">
            <div class="figure-half">
              
            </div>
            <div class="caption-center">Amplitude over time plot of
              a Symbol after being filtered by a halfsine-shaped pulse-
              former</div>
          </td>
          <td style="vertical-align: top">
            <div class="figure-half">
              
            </div>
            <div class="caption-center">Power-density spectrum of a
              halfsine shaped Symbol</div>
          </td>
        </tr>
      </table>
    </div>

```



```

<tr>
  <td style="vertical-align: top; width: 50%">
    <div class="figure-half">
      
    </div>
    <div class="caption-center">Amplitude over time plot of
    a Symbol after being filtered by a sinc-shaped pulseformer</div>
  </td>
  <td style="vertical-align: top">
    <div class="figure-half">
      
    </div>
    <div class="caption-center">Power-density spectrum of a
    sinc shaped Symbol</div>
  </td>
</tr>
<tr>
  <td style="vertical-align: top; width: 50%">
    <div class="figure-half">
      
    </div>
    <div class="caption-center">Amplitude over time plot of
    a Symbol after being filtered by a root-raised-cosine-
    shaped pulseformer</div>
  </td>
  <td style="vertical-align: top">
    <div class="figure-half">
      
    </div>
    <div class="caption-center">Power-density spectrum of a
    root-raised-cosine shaped Symbol</div>
  </td>
</tr>
</table>
</div>

```

Abbildung 19 Quellcode der Tabellenkonstruktion für die „Illustration“-Seite

5.1.3 Resultate

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit, sprich die erzeugten Webseiten präsentiert. Jedoch wird hier der Fokus auf die wesentlichen Elemente der jeweiligen Seiten gelegt und nicht der volle Umfang dargestellt. Der gesamte Seitenquelltext ist im Anhang der Arbeit einzusehen.

5.1.3.1 Tutorial

Die folgende Abbildung zeigt die genannte Slideshow wie sie auf der Website erscheint. Durch Mausklick auf die grün hinterlegten Pfeilsymbole können die Bildmontagen durchgeschaltet werden. Es handelt sich nur um einen Bildausschnitt der gesamten Website.

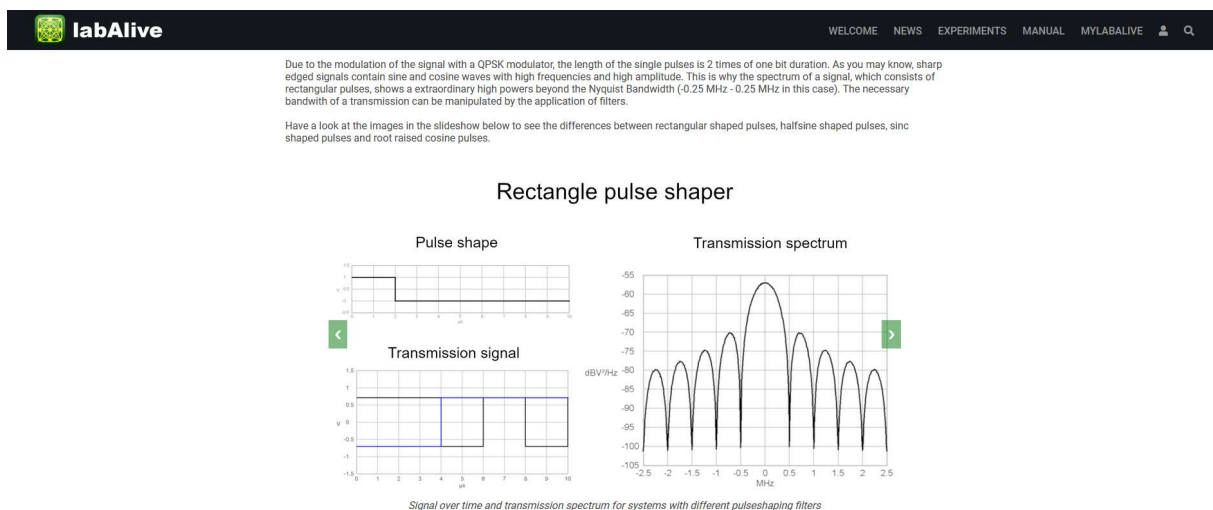


Abbildung 20 Slideshow auf der „Tutorial“-Seite zum Thema Pulseshaping

5.1.3.2 Experiment

Folgend dargestellt ist die Versuchsanleitung auf der Seite „Experiment“ des Themengebiets Pulseshaping. Es handelt sich nur um einen Bildausschnitt der gesamten Website.

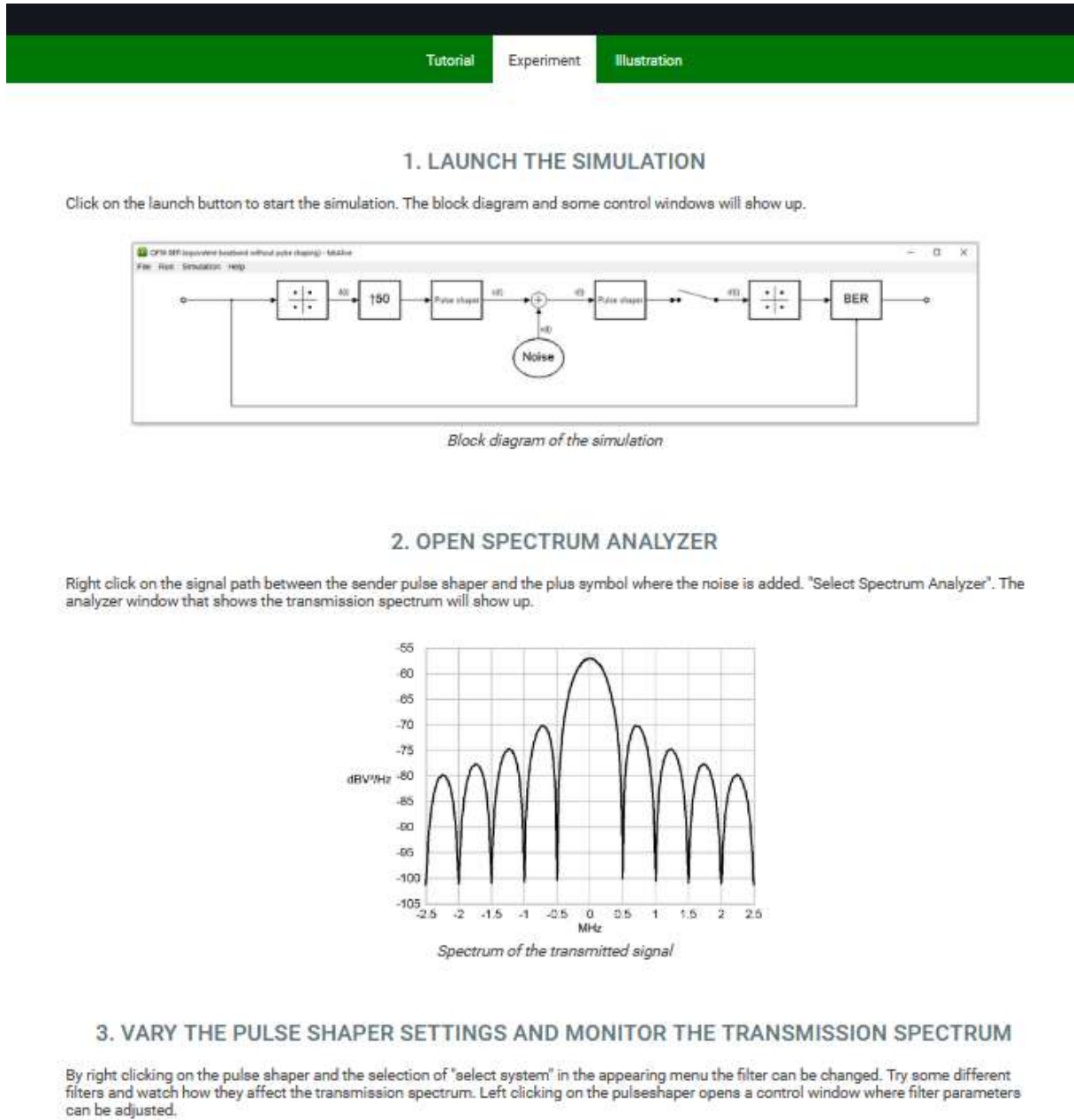


Abbildung 21 "Experiment" Seite für den Versuch zum Thema Pulseshaping

5.1.3.3 Illustration

Hier ist in Teilen die beschriebene Tabellenkonstruktion der „Illustration“-Seite dargestellt. Es handelt sich nur um einen Bildausschnitt der gesamten Website.

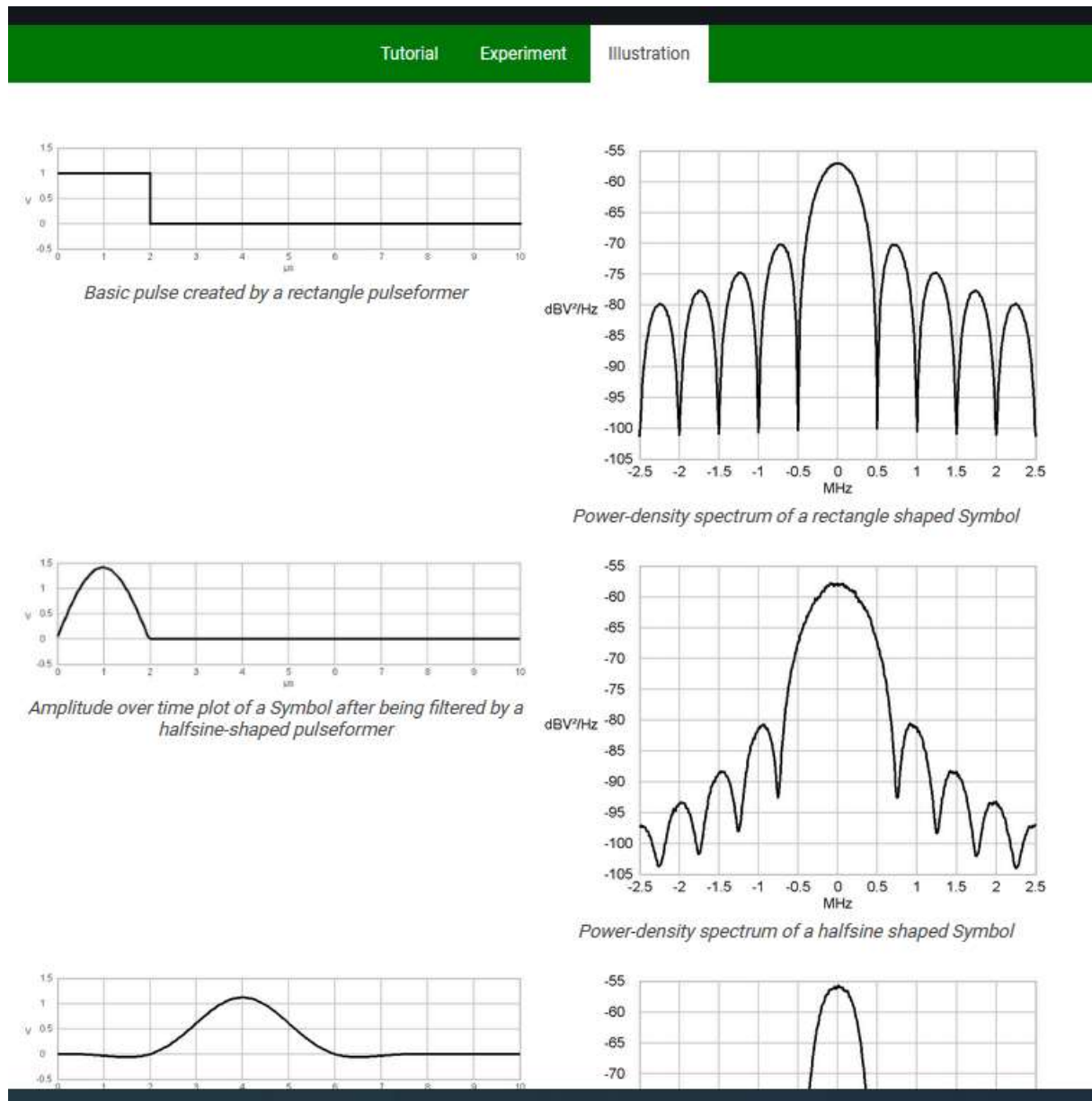


Abbildung 22 "Illustration"-Seite zum Thema Pulseshaping

5.2 Augendiagramme und Konstellationsdiagramme zu verschiedenen eB/N_0 Verhältnissen

Auch der neu erzeugte Inhalt für das Webportal zum Thema Augendiagramme und eB/N_0 Verhältnis sind, vergleichbar zum Thema Impulsformung und Übertragungsspektrum in die drei Abschnitte „Tutorial“, „Experiment“ und „Illustration“ gegliedert.

5.2.1 Grundlagen

Bei einem Augendiagramm handelt es sich um einen mit einem Oszilloskop aufgezeichneten Graphen, der alle möglichen Signalverläufe eines empfangenen Signals übereinander darstellt. Das so entstehende Bild ähnelt bei einer binären Übertragung der Form eines Auges, was die Namensgebung erklärt. Die Augenöffnung, also der Abstand zwischen den Signalpfaden, gibt Aufschluss über die Qualität der Übertragung. Bei einer ungestörten Übertragung liegen alle Signalpfade direkt übereinander und die Augenöffnung ist maximal. Wird ein von Rauschen überlagertes Signal auf diese Art vermessen, so weichen die Signalpfade aufgrund der enthaltenen Rauschanteile in der Amplitude voneinander ab, wodurch die Augenöffnung kleiner wird. So wirkt sich das Verhältnis von Signalleistung zu Rauschleistung direkt auf die Augenöffnung aus. Bei einer kleineren Augenöffnung steigt die Wahrscheinlichkeit von Bitfehlern. Ein Augendiagramm kann jedoch nur bei Übertragungen, die die Information in der Amplitude des Signals tragen, verwendet werden. (2)

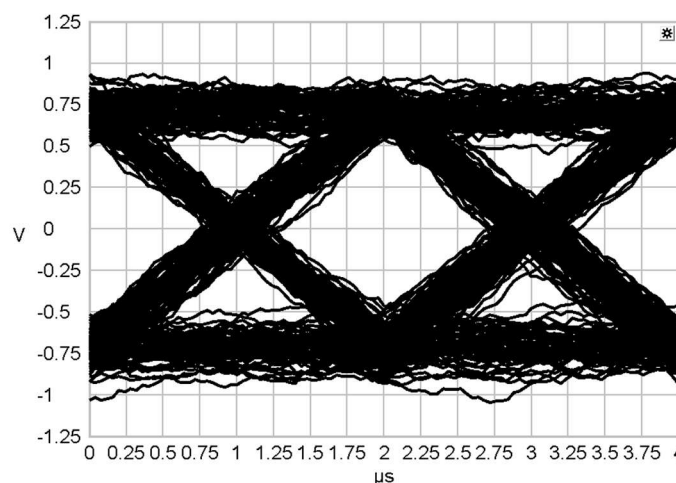


Abbildung 23 Augendiagramm eines schwach gestörten Signals

Ein Konstellationsdiagramm liefert ähnliche Informationen wie ein Augendiagramm. Jedoch ist das Konstellationsdiagramm für Übertragungen, bei denen die Information als komplexer Wert übertragen wird, geeignet. Das Diagramm besteht aus Punkten in der komplexen Ebene, die dem abgetasteten Wert entsprechen. Bei einer vierstufigen Übertragung liegen, vergleichbar zu einem Augendiagramm, die Punkte an den vier Zustände repräsentierenden Positionen in der komplexen Ebene exakt übereinander. Ein dem Signal hinzuaddiertes Rauschen verändert jedoch die Lage dieser Punkte. Wie beim Augendiagramm kann hier anhand des Abstands der entstehenden Punkteansammlungen auf die Qualität der Übertragung geschlossen werden. (2)

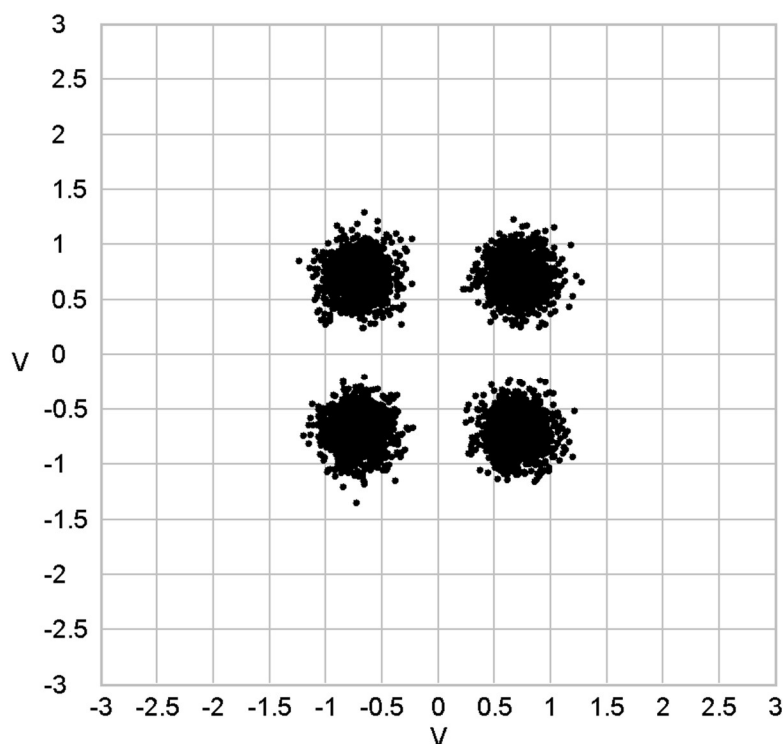


Abbildung 24 Konstellationsdiagramm eines schwach gestörten QPSK modulierten Signals

Durch ein Bitfehlermessgerät, dem die Sende-bitfolge bekannt ist, kann die Anzahl der fehlerhaft übertragenen Bits ermittelt, und so Rückschlüsse auf die Übertragungsqualität gezogen werden. Diese lässt sich mit den Messergebnissen aus Augen- und Konstellationsdiagramm vergleichen.

5.2.2 Vorgehensweise zur Content Erzeugung

Der Abschnitt „Tutorial“ in diesem Themengebiet ist dem Aufbau des gleichnamigen Teils der Website zum Thema „Impulsformung“ nachempfunden. So wird auch hier auf die bereits beschriebene Slideshow zurückgegriffen. Die für die Bildmontage verwendeten Konstellationsdiagramme konnten äquivalent zu den Spektralanalysen, die für die im vorherigen Kapitel beschriebenen Themengebiet verwendet wurden, erstellt werden. Die Abbildungen des Kontrollfensters für das E_b/N_0 Verhältnis, sowie die des „Bit error rate meter“ wurden auch hier mit dem „Snipping Tool“ erstellt. Ebenso musste für die Speicherung der erzeugten Augendiagramme das „Snipping Tool“ anstatt der simulationsinternen Speicherfunktion verwendet werden, da damit nur der aktuellste Signalpfad und nicht, wie für ein Augendiagramm benötigt, eine Vielzahl von Signalpfaden abgebildet wurden.

Auch der Abschnitt „Experiment“ ist sowohl optisch als auch in der Art und Weise seiner Erzeugung mit dem entsprechenden Teil der Webseite zum Thema „Impulsformung“ vergleichbar.

Dies gilt auch für den hier ebenfalls vorhandenen Abschnitt „Illustration“.

5.2.3 Resultate

In den Folgenden Unterkapiteln werden die essentiellen Bereiche des neu geschaffenen Inhalts dargestellt. Der gesamte Seitenquelltest kann im Anhang der Arbeit eingesehen werden.

5.2.3.1 Tutorial

Folgend ist ein Ausschnitt aus der Website „Tutorial“ zum Versuch zum Thema Augendiagramme und Konstellationsdiagramme dargestellt.

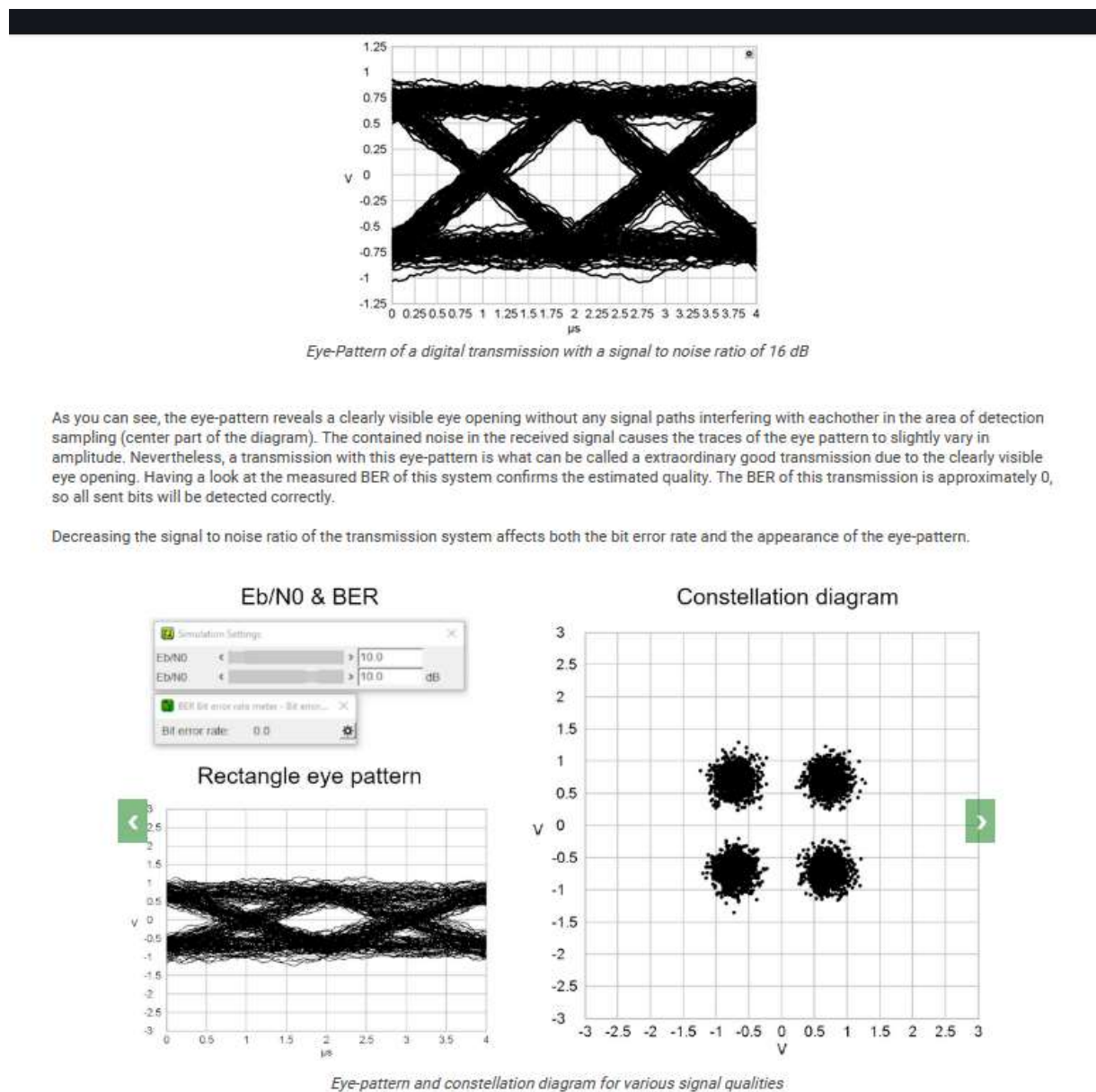


Abbildung 25 Slider der "Tutorial" Seite zum Thema Augendiagramme und Konstellationsdiagramme

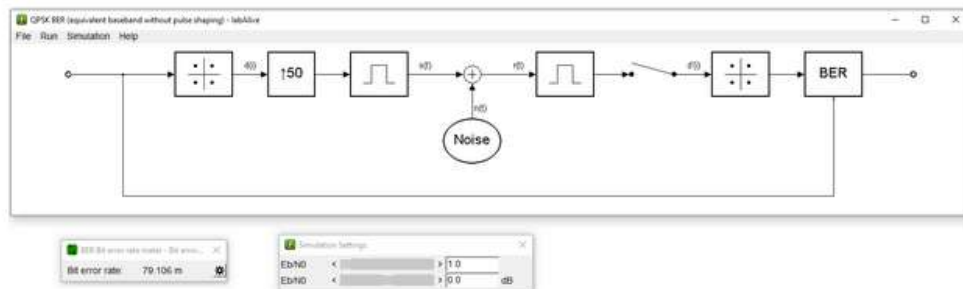
5.2.3.2 Experiment

Nachfolgend ist die Versuchsanleitung für den Versuch zum Themengebiet „Augendiagramme und Konstellationsdiagramme“ abgebildet. Diese ist ähnlich der Versuchsanleitung zum Thema „Pulseforming“ aufgebaut. Die Abbildung zeigt nur einen Auszug.



1. LAUNCH THE SIMULATION

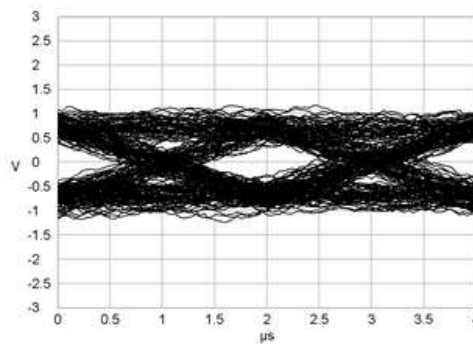
Click on the launch button to start the simulation. The block diagram and some control windows will show up.



Block diagram of the simulation with a bit error meter and the S/N ratio control window

2. OPEN THE OSCILLOSCOPE

Click on the path of the receive signal between the receive filter and the sampler to open an oscilloscope. The diagram shows the eye pattern of the signal after passing the AWGN channel, so noise is included.



Eye-pattern of the received signal

3. OPEN THE CONSTELLATION DIAGRAM

Abbildung 26 Versuchsbeschreibung zum Thema Augen- und Konstellationsdiagramm

5.2.3.3 Illustration

Die im Folgenden abgebildete „Illustration“-Seite ähnelt sich im Aufbau ebenfalls der im vorherigen Kapitel Beschriebenen. Auch hier ist nur ein Auszug dargestellt.

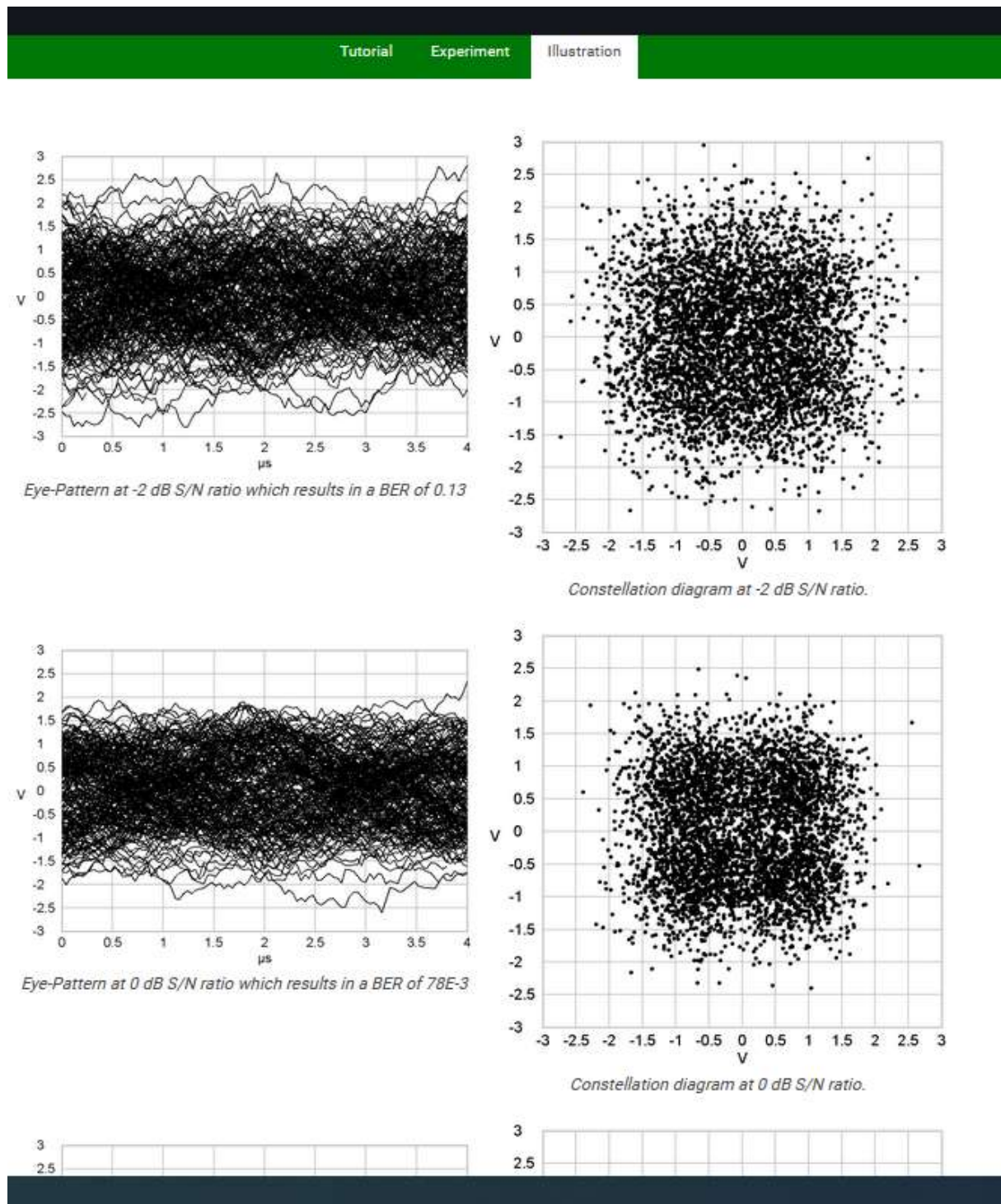


Abbildung 27 „Illustration“ Seite zum Thema Augen- und Konstellationsdiagramm

5.3 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Der neu erstellte Content zum Thema „OFDM“ unterscheidet sich in einigen Bereichen zu dem in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Inhalt. Im Abschnitt „Tutorial“ werden die Grundlagen des Übertragungsverfahrens „OFDM“ erläutert und die Bedeutung der wichtigsten Parameter einer OFDM-Übertragung erklärt. Ferner werden die Formeln zur Berechnung dieser Parameter zur Verfügung gestellt.

Anstelle eines tatsächlichen Experiments beinhaltet der Abschnitt mit dem Titel „Experiment“ eine Übungsaufgabe zur Berechnung der Parameter einer Wireless-LAN Übertragung.

Grundlage für diesen Webcontent war die Masterarbeit von Dominic Nolde mit dem Titel „Paradigm Examples of Online Experiments for a Virtual Communications Lab“. Die theoretischen Grundlagen, das Formelwerk sowie die Übungsaufgabe wurden dieser Arbeit entnommen.

5.3.1 Grundlagen

Unter Orthogonal Frequency Division Multiplexing versteht man ein Übertragungsverfahren, bei dem die verfügbare Übertragungsbandbreite in mehrere schmale Subkanäle unterteilt wird. (3) Geschickte Verwendung der einzelnen Subkanäle ermöglicht eine Übertragung nahe an der theoretisch maximalen Kanalkapazität. So können, durch gezielte Leistungsverteilung unter den einzelnen Kanälen bis hin zur gezielten Zu- und Abschaltung von Einzelträgern die zum Zeitpunkt der Übertragung vorherrschenden Eigenschaften des Übertragungskanals optimal ausgenutzt werden.

5.3.2 Vorgehensweise zur Content Erzeugung

Die Erläuterungen im Abschnitt „Tutorial“ wurden mit leichten sprachlichen Anpassungen der oben genannten Arbeit entnommen. Selbiges trifft auf das Formelwerk zu. Für die Anfertigung der veranschaulichenden Grafik zur Multi Carrier Transmission wurde das kostenfreie Vektorgrafikprogramm „Inkscape“ verwendet. Zur Darstellung der mathematischen Formeln

auf der Website wurde der XML-Dialekt MathML (mathematical markup language) verwendet. (4) Jedoch wurde, anstatt direkt in MathML zu programmieren, ein Onlineeditor genutzt, der mathematische Formeln aus einschlägiger Notation in die benötigte Sprache übersetzt. So mussten die Formeln lediglich in den Editor eingetragen und der generierte Code in den Seitenquelltext übertragen werden. Der genutzte Generator ist unter folgender URL erreichbar: <https://demo.wiris.com/mathtype/en/developers.php>

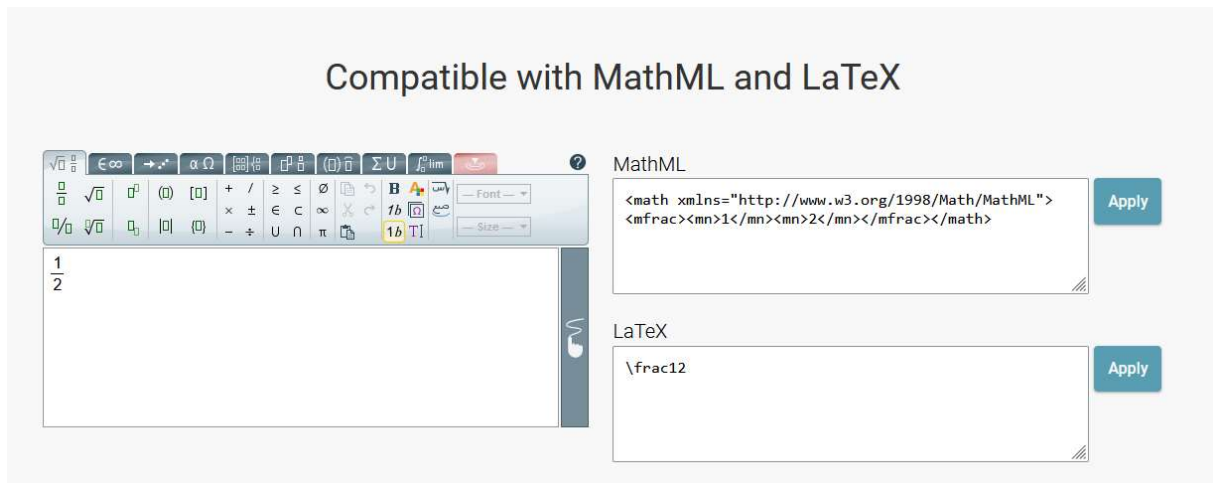


Abbildung 28 MathML Editor zur Erzeugung von MathML-Code für die Darstellung von Formeln in HTML (5)

Für die Übungsaufgabe, die sich im Abschnitt „Experiment“ wiederfindet, wurde erneut auf die Darstellung in Tabellenform zurückgegriffen. Als Besonderheit ist hier zu erwähnen, dass die Lösungen der Übungsaufgabe auf dieser Seite verborgen sind und durch das hovern des Mauszeigers über dem entsprechenden Feld dargestellt werden.

Nachfolgend ist beispielhaft der Code für ein mathematisches Formelzeichen dargestellt.

```
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>N</mi>
    <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
      <mi>v</mi>
    </mrow>
  </msub>
</math>
```

Abbildung 29 Beispielhafter MathML Code

Der Nachfolgende Code implementiert die beschriebene „Mouseover“-Funktion. Im Normalzustand wird die Bilddatei „question-mark.png“ angezeigt. Wird der Mauszeiger über die angezeigte Bilddatei bewegt, so erscheint die angegebene mathematische Formel.

```
<div class="formel">
  <div class="figure" align="center">
    
  </div>
  <span class="formeltext"><div class="figure-half">
    <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
      <msub>
        <mi>N</mi>
        <mi>v</mi></msub>
        <mo>=</mo>
        <mi>N</mi>
        <mo>-</mo>
        <mo>(</mo>
        <msub>
          <mi>N</mi>
          <mi>p</mi></msub>
        <mo>+</mo>
        <msub>
          <mi>N</mi>
          <mi>c</mi></msub>
        <mo>)</mo></math>
      </div></span>
</div>
```

Abbildung 30 Code für die „Mouse-Over“ Funktionalität

5.3.3 Resultate

Wie in den vorherigen Kapiteln sind hier die Ergebnisse der Arbeit exemplarisch dargestellt.

5.3.3.1 Tutorial

Folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus der „Tutorial“-Seite des Themengebiets OFDM mit einigen der beschriebenen Formeln in entsprechender Darstellung.

In the following the most important OFDM parameters will be introduced. As an example, all the parameters will be calculated for DVB-T transmission.

OFDM PARAMETERS

Subcarrier (DFT/FFT length)

The total number of subcarriers- or channels N , consists of the number of data-subcarriers N_C , pilot-subcarriers N_P and null subcarriers N_V .

$$N = N_C + N_P + N_V$$

N Total Number of Subcarriers

N_C CI Duration

N_P CI Duration

N_V Basic OFDM Symbol Duration

The number of subcarriers N always occurs in a power of two and expresses also the length of the DFT / FFT.

Data-Subcarrier

The data subcarriers N_C represent the number of subchannels used for data transmission. In a simple OFDM structure without virtual subcarriers, the number of subchannels is equal to the FFT length N .

Pilot-Subcarrier

OFDM allows the insertion of so-called pilot tones. Pilot tones are generated by modulating individual subcarriers with specified complex symbols in a fixed time sequence. The complex values of the pilot tones are known in advance to the receiver so that an estimate of the channel inflows or a fine synchronization of the symbol clock can be carried out in the receiver. Pilot subcarriers N_P however cannot be used for channel estimation as they are too far apart for interpolation. These Pilot subcarriers only serve the tracking of the carrier synchronization.

Null-Subcarrier

Null subcarriers N_V are mandated in most OFDM wireless standards. These subcarriers are not occupied but serve to reduce the PAPR of multi-carrier transmission. This is achieved by reordering the null-subcarriers and data-subcarriers. In addition, they are used to prevent leakage to adjacent bands since OFDM Systems usually do not transmit any data on the subcarriers near the two edges of the assigned band. The unused subcarriers are also known as guard subcarriers or virtual subcarriers. Altogether they are called guard band.

Discrete Length of the Guard Interval

A guard interval, also known as cyclic prefix, is used to prevent certain transmissions from mixing. They increase the immunity to propagation delays, echoes, and reflections, against which digital data tends to be very vulnerable. The length of the guard interval (GI) determines how susceptible a transmission is. The longer such an interval is, the better it protects against interference, but the data rate is reduced.

$$N_G = \frac{T_G \times N}{T_S}$$

N_G Discrete Length of GI

T_G CI Duration

N Total Number of Subcarriers

T_S Basic OFDM Symbol Duration

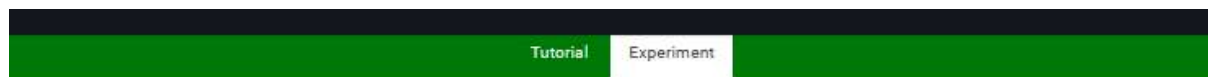
To eliminate ISI, a guard interval is usually inserted at the beginning of each OFDM symbol. In addition, it corresponds to a copy of the last seconds of the basic OFDM symbol. The main idea behind this method is to dimension the GI so large, that the signal components delayed by the channel, only disturb the signal component during the GI duration and not the basic OFDM symbol.

For highly frequency selective channels, the cyclic prefix should increase accordingly. In existing standards like LTE with extended prefix or IEEE

Abbildung 31 „Tutorial“-Seite des Themengebiets OFDM

5.3.3.2 Experiment

Im Folgenden ist die beschriebene Übungsaufgabe, in der die aufgeführten OFDM Parameter zu bestimmen sind, dargestellt. Die Benötigten Formeln können dem „Tutorial“-Teil entnommen werden.



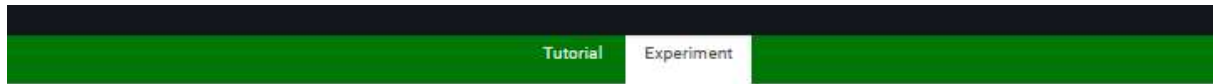
CALCULATION OF WLAN IEEE 802.11G OFDM PARAMETERS

Determine the missing parameters for IEEE 802.11g (WLAN) in the table below by using the necessary formulas given in the corresponding tutorial to complete the parameter set of this common wireless transmission standard.

Parameter	value for IEEE 802.11g	Comment
Number of Subcarriers N	64	
Number of Data Subcarriers N_c	52	
Number of Pilot Subcarriers N_p	4	
Number of Null Subcarriers N_v	?	?
Discrete Length of GI N_G	16	
GI Duration T_G	?	?
Source Symbol Duration T_D	?	?
Symbol Duration t_s	?	?
Basic OFDM Symbol Duration T_s	?	?
Total OFDM Symbol Duration $T's$	$4 \mu s$	
Bit Rate RB_{brutto}	?	?
Bit per Symbol n	6	
Code Rate R_c	0,75	
Symbol Rate f_s	?	?
Subcarrier Spacing F_s	?	?
Bandwidth Efficiency β	?	?
Nyquist Bandwidth B_n	?	?
Nyquist Bandwidth with DC Subcarrier B_n	?	?
Parameter	value for IEEE 802.11g	Comment

Abbildung 32 Übungsaufgabe der OFDM-„Experiment“-Seite mit verdeckten Lösungen

Ferner kann zur Kontrolle der Ergebnisse die „Mouse-Over“ Funktion genutzt werden. Wie in der nachfolgenden Grafik zu sehen, erscheint das Ergebnis der Aufgabe beim hovern des Mauszeigers über dem Fragezeichen der entsprechenden Zeile. Auch die zur Bestimmung benötigte Berechnungsvorschrift kann so eingesehen werden.



CALCULATION OF WLAN IEEE 802.11G OFDM PARAMETERS

Determine the missing parameters for IEEE 802.11g (WLAN) in the table below by using the necessary formulas given in the corresponding tutorial to complete the parameter set of this common wireless transmission standard.

Parameter	value for IEEE 802.11g	Comment
Number of Subcarriers N	64	
Number of Data Subcarriers N_c	52	
Number of Pilot Subcarriers N_p	4	
Number of Null Subcarriers N_u	?	?
Discrete Length of GI N_G	16	
GI Duration T_G	?	?
Source Symbol Duration T_D	0,8 μs	
Symbol Duration t_s	?	?
Basic OFDM Symbol Duration T_s	?	?
Total OFDM Symbol Duration $T's$	4 μs	
Bit Rate $R_{bitrate}$	?	?
Bit per Symbol n	6	
Code Rate R_c	0,75	
Symbol Rate f_s	?	?
Subcarrier Spacing F_s	?	?
Bandwidth Efficiency β	?	?
Nyquist Bandwidth B_n	?	?
Nyquist Bandwidth with DC Subcarrier B_n	?	?
Parameter	value for IEEE 802.11g	Comment

Abbildung 33 Übungsaufgabe der OFDM-„Experiment“-Seite mit aufgedeckter Lösung

6 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit konnten einige neue Inhalte für das Web-Portal „labAlive“ erstellt werden. Die anschauliche Aufbereitung der zum Teil sehr komplexen Themen vermag es hoffentlich, Interessierten den Einstieg in die Kommunikationstechnik zu erleichtern und als unterhaltsam zu gestalten. Durch die Interaktionsmöglichkeit mit der Website, die durch die implementierten Slideshows sowie die Übungsaufgabe zur Parameterberechnung gegeben ist, sollte es dem Nutzer leichtfallen, intrinsische Motivation aufzubauen und sich gern mit der Materie weiter zu beschäftigen. Das entstandene Bildmaterial lädt zum Nachahmen der Messungen mittels der Simulation ein. Somit ist das Webportal um ein weiteres kleines Stück in die richtige Richtung gewachsen.

Jedoch handelt es sich beim Projekt „labAlive“ um ein Projekt, welches niemals abgeschlossen sein wird. Die Bandbreite an Themengebieten, die noch in Form von Tutorials, Experimenten und Illustrationen aufbereitet werden können, ist nahezu unendlich. Eventuell kann diese Arbeit eine Inspiration oder Grundstein für weitere Arbeiten ähnlicher Art und Weise sein.

7 Anhang

7.1 Quellcode

7.1.1 Quellcode zur „Tutorial“-Seite der Thematik OFDM

```

<h1>Fundamentals of OFDM</h1>
<p>Multi-carrier transmission is one of today's key
    technologies for communication systems. They use several sinusoidal
    waves, which are transmitted simultaneously. The basic idea of
    multicarrier technology is to fragment a frequency-selective channel
    into narrowband subchannels such that each of these subchannels becomes
    approximately non-selective. Furthermore, another principle of
    multi-carrier transmission is to convert a serial high rate data stream
    on to multiple parallel low rate sub-streams.</p>

<div class="figure-half">
    
</div>
<div class="caption">Multi Carrier Transmission</div>
<p>
    OFDM (Orthogonal Frequency
    Division Multiplexing) and OFDM-based transmission schemes are
    dominating current wireless communication standards (WLAN, LTE, DAB and
    DVB). This is due to the following capabilities and benefits of OFDM:

</p>

<br>
<br>

<p style="padding-left: 150px; line-height: 30px;">
    • Robustness against frequency selective fading with the
    division of information symbols in parallel narrowband channels<br />
    • Efficient use of spectrum due to overlapping transmission of
    orthogonal parallel narrowband channels<br />
    • Low-complexity implementation with the use of Fast Fourier Transforms (FFT)<br />
    • Low-complexity channel equalization compared with
    single-carrier solutions<br />
    • Robustness against intersymbol
    interference (ISI) with the use of cyclic prefix<br />
    • Robustness against impulsive noise<br />
    • Simple integration
    of multiple-input multiple-output (MIMO) systems in the OFDM
    transmitter/receiver chain<br />
    • Ability to easily integrate
    adaptive modulation and coding techniques to efficiently exploit the
    radio channel<br />
    • Provision of direct extension to a
    multiplexing scheme with orthogonal division multiple access (OFDMA)
    for resource sharing

</p>

<br>
<br>

<p>All in all, compared to single-carrier modulation, OFDM main
  
```

advantages include high spectral efficiency, robustness against multipath ISI, the simplicity to equalize in frequency domain and the efficiency of applying FFT. Of course, there are also disadvantages like the large Peak to Average Power Ratio, out auf band leakage and the sensitivity to imperfect time and frequency synchronization. The OFDM method is also used for wired transmission and also known as Discrete MultiTone (DMT).

<p>

In the following the most important OFDM parameters will be introduced. As an example, all the parameters will be calculated for DVB-T transmission.

</p>

<p>

OFDM Parameters

</p>

<p>

Subcarrier (DFT/FFT length) The total number of subcarriers- or channels

$$N$$

, consists of the number of data-subcarriers

$$N_C$$

, pilot-subcarriers

$$N_P$$

and null subcarriers

$$N_V$$

.

</p>

<p>

$$N = N_C + N_P + N_V$$

</p>

$$N = N_C + N_P + N_V$$

$$N = N_C + N_P + N_V$$

$$N = N_C + N_P + N_V$$

```

<mtext>Total&#xA0;Number&#xA0;of&#xA0;Subcarriers</mtext>
<mspace linebreak="newline" />
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>C</mi></msub>

<mo>&#x2007;</mo>

<mtext>GI&#xA0;Duration</mtext>
<mspace linebreak="newline" />
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>P</mi></msub>

<mo>&#x2007;</mo>
<mtext>GI&#xA0;Duration</mtext>
<mspace linebreak="newline" />
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>V</mi></msub>

<mo>&#x2007;</mo>
<mtext>Basic&#xA0;OFDM&#xA0;Symbol&#xA0;Duration</mtext>
<mspace linebreak="newline" /></math>

```

<p>

The number of subcarriers

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <mi>N</mi></math>

```

always occurs in a power of two and expresses also the length of the DFT / FFT.

 Data-Subcarrier

The data subcarriers

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>N</mi>
    <mi>C</mi></msub></math>

```

represent the number of subchannels used for data transmission. In a simple OFDM structure without virtual subcarriers, the number of subchannels is equal to the FFT length

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <mi>N</mi></math>

```

.

 Pilot-Subcarrier
 OFDM

allows the insertion of so-called pilot tones. Pilot tones are generated by modulating individual subcarriers with specified complex symbols in a fixed time sequence. The complex values of the pilot tones are known in advance to the receiver so that an estimate of the channel inflows or a fine synchronization of the symbol clock can be carried out in the receiver. Pilot subcarriers

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>N</mi>
    <mi>P</mi></msub></math>

```

however cannot be used for channel estimation as they are too far apart for interpolation. These Pilot subcarriers only serve the tracking of the carrier synchronization.

</p>

<p>

```

<br> <strong>Null-Subcarrier</strong> <br>Null subcarriers
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">

```

$$\sum_{n=0}^{N-1} V_n$$

are mandated in most OFDM wireless standards. These subcarriers are not occupied but serve to reduce the PAPR of multi-carrier transmission. This is achieved by reordering the null-subcarriers and data-subcarriers. In addition, they are used to prevent leakage to adjacent bands since OFDM Systems usually do not transmit any data on the subcarriers near the two edges of the assigned band. The unused subcarriers are also known as guard subcarriers or virtual subcarriers. Altogether they are called guard band.

</p>
<p>

Discrete Length of the Guard Interval A guard interval, also known as cyclic prefix, is used to prevent certain transmissions from mixing. They increase the immunity to propagation delays, echoes, and reflections, against which digital data tends to be very vulnerable. The length of the guard interval (GI) determines how susceptible a transmission is. The longer such an interval is, the better it protects against interference, but the data rate is reduced.

</p>

<p>

$$\frac{\sum_{n=0}^{N-1} G_n}{\sum_{n=0}^{N-1} T_n G_n S_n}$$

</p>

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">

$$\sum_{n=0}^{N-1} G_n$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} G_n$$

Discrete Length of GI

linebreak="newLine" />

$$\sum_{n=0}^{N-1} T_n G_n S_n$$

GI Duration

linebreak="newLine" />

$$\sum_{n=0}^{N-1} G_n$$

$$\frac{\text{Total Number of Subcarriers}}{\text{Basic OFDM Symbol Duration}}$$

To eliminate ISI, a guard interval is usually inserted at the beginning of each OFDM symbol. In addition, it corresponds to a copy of the last seconds of the basic OFDM symbol. The main idea behind this method is to dimension the GI so large, that the signal components delayed by the channel, only disturb the signal component during the GI duration and not the basic OFDM symbol.

For highly frequency selective channels, the cyclic prefix should increase accordingly. In existing standards like LTE with extended prefix or IEEE 802.11, the cyclic prefix is $\frac{1}{4}$ of the OFDM symbol duration.

Guard Interval Duration The exact duration of the guard interval results in:

$$\frac{T_G}{N_G} = \frac{T_G}{N_G} \cdot \frac{N}{N} = \frac{T_G \cdot N}{N_G \cdot N} = \frac{T_G \cdot N}{N_G \cdot N} = \frac{T_G \cdot N}{N_G \cdot N}$$

Discrete Length of GI

```

<mspace linebreak="newline" />
<msub>
<mi>T</mi>
<mi>G</mi></msub>

<mo>&#x2007;</mo>
<mtext>GI&#xA0;Duration</mtext>
<mspace linebreak="newline" />
<mi>N</mi>
<mo>&#x2007;</mo>

<mtext>Total&#xA0;Number&#xA0;of&#xA0;Subcarriers</mtext>
<mspace linebreak="newline" />
<msub>
<mi>T</mi>
<mi>S</mi></msub>
<mo>&#x2007;</mo>

<mtext>Basic&#xA0;OFDM&#xA0;Symbol&#xA0;Duration</mtext>
<mspace linebreak="newline" />
<msub>
<mi>t</mi>
<mi>s</mi></msub>
<mo>&#x2007;</mo>
<mtext>Symbol&#xA0;Duration</mtext></math>

```

<p>

 Source Symbol Duration
 The source symbol duration

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>T</mi>
    <mi>D</mi></msub></math>

```

is referred to as the duration of the symbols to be transmitted between source, channel coder and interleaver.

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>T</mi>
    <mi>D</mi></msub></math>

```

of the serial data symbols results after serial-to-parallel conversion in the Total OFDM Symbol Duration.

</p>

<p>

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="block">
  <mi>T</mi>
  <msub>
    <mo>'</mo>
    <mi>s</mi></msub>
    <mo>=</mo>
    <msub>
      <mi>N</mi>
      <mi>C</mi></msub>
      <mo>&#xD7;</mo>
      <msub>
        <mi>T</mi>
        <mi>D</mi></msub></math>

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="block">
  <msub>

```

```

        <mi>T</mi>
        <mi>D</mi></msub>
        <mo>=</mo>
        <mfrac>
        <mrow>
        <mi>T</mi>
        <msub>
        <mo>'</mo>
        <mi>s</mi></msub></mrow>
        <msub>
        <mi>N</mi>
        <mi>C</mi></msub></mfrac></math>
</p>
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
    <msub>
    <mi>N</mi>
    <mi>C</mi></msub>
    <mo>&#x2007;</mo>
    <mtext>Data&#xA0;Subcarriers</mtext>
    <mspace linebreak="newline" />
    <msub>
    <mi>T</mi>
    <mi>D</mi></msub>
    <mo>&#x2007;</mo>
    <mtext>Source&#xA0;Symbol&#xA0;Duration</mtext>
    <mspace linebreak="newline" />
    <mi>T</mi>
    <msub>
    <mo>'</mo>
    <mi>s</mi></msub>
    <mo>&#x2007;</mo>
    <mtext>Total&#xA0;OFDM&#xA0;Symbol&#xA0;Durtion</mtext></math>
<br>
<p>
    <br> <strong>Symbol Duration</strong> <br> For the
    determination of the OFDM time raster, it is very helpful to use the
    symbol duration of the transmit signal, also called sampling period,
    before the RF modulator, as a reference. The symbol duration is as
    follows:
</p>
<p>
    <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="block">
        <msub>
        <mi>t</mi>
        <mi>s</mi></msub>
        <mo>=</mo>
        <mfrac>
        <mrow>
        <mi>T</mi>
        <msub>
        <mo>'</mo>
        <mi>s</mi></msub></mrow>
        <mrow>
        <mi>N</mi>
        <mo>+</mo>
        <msub>
        <mi>N</mi>
        <mi>G</mi></msub></mrow></mfrac>

```



```

        <mo>=</mo>
        <mfrac>
        <msub>
        <mi>T</mi>
        <mi>s</mi></msub>
        <mi>N</mi></mfrac>
        <mo>=</mo>
        <mfrac>
        <msub>
        <mi>T</mi>
        <mi>G</mi></msub>
        <msub>
        <mi>N</mi>
        <mi>G</mi></msub></mfrac></math>
</p>
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <mi>N</mi>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Total⋅Number⋅of⋅Subcarriers</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <msub>
  <mi>N</mi>
  <mi>G</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Discrete⋅Length⋅of⋅GI</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <msub>
  <mi>t</mi>
  <mi>s</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Symbol⋅Duration</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <msub>
  <mi>T</mi>
  <mi>G</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>GI⋅Duration</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <msub>
  <mi>T</mi>
  <mi>s</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Basic⋅OFDM⋅Symbol⋅Duration</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <mi>T</mi>
  <msub>
  <mo>'</mo>
  <mi>s</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Total⋅OFDM⋅Symbol⋅Duration</mtext></math>
<br>
<p>
  <br> <strong>Basic OFDM Symbol Duration</strong> <br> The
  long OFDM symbol duration in OFDM systems opens a particularly elegant
  way to avoid ISI. As already mentioned, it can be reached by prefixing
  a GI. However, the Basic OFDM symbol duration
  <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">

```

$$T_s$$

is without a GI and the number of data subcarriers is equal to the total number of subcarriers.

</p>
<p>

$$T_s = N \cdot T$$

</p>

$$T_s = N \cdot T$$

Basic OFDM Symbol Duration

Total Number of Subcarriers

Symbol Duration

<p>

Total OFDM Symbol Duration The total OFDM symbol duration

$$T_s = T$$

is the basic OFDM symbol duration extended by the GI.

</p>
<p>

$$T_s = T + T_g$$

```

        <mi>T</mi>
        <mi>G</mi></msub>
        <mo>=</mo>
        <mo>(</mo>
        <mi>N</mi>
        <mo>+</mo>
        <msub>
        <mi>N</mi>
        <mi>G</mi></msub>
        <mo>)</mo>
        <mo>⋅</mo>
        <msub>
        <mi>t</mi>
        <mi>s</mi></msub></math>
</p>
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <mi>N</mi>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Total⋅Number⋅of⋅Subcarriers</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <msub>
  <mi>N</mi>
  <mi>G</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Discrete⋅Length⋅of⋅GI</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <msub>
  <mi>t</mi>
  <mi>s</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Symbol⋅Duration</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <msub>
  <mi>T</mi>
  <mi>G</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>GI⋅Duration</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <msub>
  <mi>T</mi>
  <mi>s</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Basic⋅OFDM⋅Symbol⋅Duration</mtext>
  <mspace linebreak="newLine" />
  <mi>T</mi>
  <msub>
  <mo>'</mo>
  <mi>s</mi></msub>
  <mo>⋅</mo>
  <mtext>Total⋅OFDM⋅Symbol⋅Duration</mtext></math>

<br>

<p>
  <br> <strong>Bit Rate</strong> <br> The bit rate
  <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
    <msub>
    <mi>R</mi>
    <mrow>

```

$$\begin{matrix} B \\ , \\ b \\ r \\ u \\ t \\ t \\ o \end{matrix}$$

of the OFDM system measures the amount of transmissible messages within a time interval. If the message set is being quantified with the unit bit, the term bit rate is used. If the same modulation alphabet is used for all subcarriers and a transmission with a GI is assumed, then the bit rate is calculated as follows:

</p>

<p>

$$\begin{matrix} R \\ B \\ , \\ b \\ r \\ u \\ t \\ t \\ o \end{matrix} = \frac{\begin{matrix} N \\ C \end{matrix} \cdot \begin{matrix} n \\ i \end{matrix} \cdot \begin{matrix} T \end{matrix}}{\begin{matrix} s \end{matrix}}$$

</p>

<p>

$$\begin{matrix} R \\ B \\ , \\ n \\ e \\ t \\ t \\ o \end{matrix} = \begin{matrix} R \end{matrix}$$

```

      <mi>C</mi></msub>
      <mo>&#xD7;</mo>
      <msub>
      <mi>R</mi>
      <mrow>
      <mi>B</mi>
      <mo>,</mo>
      <mi>b</mi>
      <mi>r</mi>
      <mi>u</mi>
      <mi>t</mi>
      <mi>t</mi>
      <mi>o</mi></mrow></msub></math>
</p>

```

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>N</mi>
    <mi>C</mi></msub>
    <mo>&#x2007;</mo>
    <mtext>Data&#xA0;Subcarriers</mtext>
    <mspace linebreak="newLine" />
    <mi>T</mi>
    <msub>
      <mo>'</mo>
      <mi>s</mi></msub>
      <mo>&#x2007;</mo>
      <mtext>Total&#xA0;OFDM&#xA0;Symbol&#xA0;Duration</mtext>
      <mspace linebreak="newLine" />
      <msub>
        <mi>n</mi>
        <mi>i</mi></msub>
        <mo>&#x2007;</mo>
        <mtext>Bit&#xA0;per&#xA0;Symbol</mtext>
        <mspace linebreak="newLine" />
        <msub>
          <mi>R</mi>
          <mi>C</mi></msub>
          <mo>&#x2007;</mo>
          <mtext>Coderate</mtext></math>

```

```

<p>
  <br> <strong>Bit per Symbol</strong> <br> In a multi-level
  transmission, a group of
  <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
    <mi>n</mi></math>
  bits are combined into one character (symbol) and transmitted within a
  signal step of the duration
  <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
    <msub>
      <mi>T</mi>
      <mi>s</mi></msub></math>
  . Indeed, there is a correspondance between the number
  <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
    <mi>n</mi></math>
  of bits transmitted per signal step and the required number of steps
  <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
    <mi>M</mi></math>
  of a digital signal.

```

$$M = 2^n$$

$$n \leq 1 + \log_2 M$$

The code rate

$$R = \frac{C}{n}$$

of an optimal, theoretically possible code of infinite length, also referred to as the channel capacity of the binary symmetric channel, can be calculated as follows:

$$R = \frac{1}{n} \log_2 \left(\frac{1}{1 - 2^{-n}} \right)$$

```

<mn>1</mn>
<mo>+</mo>
<mi>p</mi>
<mo>&#xD7;</mo>
<msub>
<mi>log</mi>
<mn>2</mn></msub>
<mo>&#xD7;</mo>
<mi>p</mi>
<mo>+</mo>
<mo>(</mo>
<mn>1</mn>
<mo>-</mo>
<mi>p</mi>
<mo>)</mo>
<mo>&#xD7;</mo>
<msub>
<mi>log</mi>
<mn>2</mn></msub>
<mo>&#xD7;</mo>
<mo>(</mo>
<mn>1</mn>
<mo>-</mo>
<mi>p</mi>
<mo>)</mo></math>
</p>

```

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>R</mi>
    <mi>C</mi></msub>
    <mo>&#x2007;</mo>
    <mtext>Code&#xA0;Rate</mtext>
    <mspace linebreak="newLine" />
    <mi>p</mi>
    <mo>&#x2007;</mo>
    <mtext>Bit&#xA0;Error&#xA0;Rate</mtext>
    <mspace linebreak="newLine" />
    <msub>
      <mi>C</mi>
      <mrow>
        <mi>b</mi>
        <mi>i</mi>
        <mi>n</mi></mrow></msub>
      <mo>&#x2007;</mo>
      <mtext>Channel&#xA0;Capacity&#xA0;Binary</mtext>
      <mspace linebreak="newLine" />
      <msub>
        <mi>R</mi>
        <mrow>
          <mi>o</mi>
          <mi>p</mi>
          <mi>t</mi></mrow></msub>
      <mo>&#x2007;</mo>
      <mtext>Optimal&#xA0;Code&#xA0;Rate</mtext></math>

```

```

<p>
  <br> <strong>Symbol Rate</strong> <br> The Symbol rate
  <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">

```

$$f_s$$

is also known as baud rate within terms of digital communications. It is the number of symbol changes, waveform changes, or signaling events, across the transmission medium per time unit using a digitally modulated signal or a line code.

</p>

<p>

$$\frac{f_s}{t_s} = 1$$

</p>

$$\begin{aligned} &f_s \\ &s \\ &\text{Symbol} \text{ Rate} \\ &t_s \\ &s \\ &\text{Symbol} \text{ Duration} \end{aligned}$$

<p>

Subcarrier Spacing Subcarriers should only suffer of flat fading. Therefore, subcarrier spacing within OFDM system must be designed carefully. The spacing

$$F_s$$

is such that the subcarriers are orthogonal, so they won't interfere with one another despite the lack of guard bands between them. This comes about by having the subcarrier spacing equal to the reciprocal of basic OFDM symbol duration, which means, that the spacing is directly related to the basic OFDM symbol duration.

</p>

<p>

$$\frac{F_s}{T_s} = 1$$

</p>

```
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>F</mi>
    <mi>s</mi></msub>
    <mo>&#x2007;</mo>
    <mtext>Subcarrier&#xA0;Spacing</mtext>
    <mspace linebreak="newLine" />
    <msub>
      <mi>T</mi>
      <mi>s</mi></msub>
    <mo>&#x2007;</mo>
    <mtext>Basic&#xA0;OFDM&#xA0;Symbol&#xA0;Duation</mtext></math>
```

<p>

 Bandwith Efficiency
 Bandwidth efficiency

```
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <mi>&#x3B2;</mi></math>
```

, also known as Spectral Efficiency, is an important piece of communications technology that specifies how many units of information per hertz are transmitted within the available bandwidth. It is thus the ratio of the data transfer rate to the occupied bandwidth, which is given in bit / s / Hz. The spectral efficiency depends on the used modulation method and the coding. Since the available bandwidths cannot be arbitrarily increased, the frequency economy and the modulation method used are decisive for spectral efficiency. The spectral efficiency is limited by the signal-to-noise ratio (SNR). The relationship between bandwidth and signal-to-noise ratio is determined by the Shannon-Hartley law. Thereafter, the channel capacitance increases linearly with the bandwidth and is affected logarithmically by the signal-to-noise ratio. With modern modulation techniques, such as OFDM and complex antenna constellations, such as multiple input multiple output (MIMO), the S / N ratio, the bandwidth efficiency can be improved. The bandwidth efficiency is adversely affected by the GI and reduced proportionately because the channel is occupied during the GI without data being transmitted. On the receiver side, the GI is not used in terms of detection, but the proportion of signal energy is lost.

</p>

<p>

```
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="block">
  <mi>&#x3B2;</mi>
  <mo>=</mo>
  <mfrac>
    <msub>
      <mi>T</mi>
      <mi>s</mi></msub>
    <mrow>
      <msub>
        <mi>T</mi>
        <mi>s</mi></msub>
      <mo>+</mo>
    </mrow>
  </mfrac>
  <mi>G</mi></math>
```

```
<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="block">
```

```

        <mi>B</mi>
        <mo>=</mo>
        <mfrac>
        <mi>N</mi>
        <mrow>
        <mi>N</mi>
        <mo>+</mo>
        <msub>
        <mi>N</mi>
        <mi>G</mi></msub></mrow></mfrac></math>
    </p>

    <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <mi>B</mi>
        <mo>B</mo>
        <mtext>Bandwith<math>Efficiency</mtext>
        <mspace linebreak="newline" />
        <mi>N</mi>
        <mo>B</mo>
        <mtext>Total<math>Number<math>of<math>Subcarriers<math>or<math>FFT/DFT<math>
Length</mtext>
        <mspace linebreak="newline" />
        <msub>
        <mi>N</mi>
        <mi>G</mi></msub>
        <mo>B</mo>
        <mtext>Discrete<math>Length<math>of<math>GI</mtext>
        <mspace linebreak="newline" />
        <msub>
        <mi>T</mi>
        <mi>G</mi></msub>
        <mo>B</mo>
        <mtext>GI<math>Duration</mtext>
        <mspace linebreak="newline" />
        <msub>
        <mi>T</mi>
        <mi>s</mi></msub>
        <mo>B</mo>
        <mtext>Basic<math>OFDM<math>Symbol<math>Duration</mtext></math>
    </p>

    <p>
        <br> <strong>Nyquist Bandwith</strong> <br> The Nyquist
        bandwidth
        <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
            <msub>
            <mi>B</mi>
            <mi>N</mi></msub>
            <mspace linebreak="newline" /></math>
        is the bandwidth required for optimal pulse shaping. Although the
        symbols of the GI do not transmit payload, they proportionately consume
        transmission bandwidth. The required Nyquist bandwidth thus results
        from the number of subcarriers and the respective subcarrier spacing.
    </p>

    <p>
        <math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="block">
            <msub>
            <mi>B</mi>
            <mi>N</mi></msub>

```

```

<mo>=</mo>
<mo>(</mo>
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>C</mi></msub>
<mo>+</mo>
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>P</mi></msub>
<mo>)</mo>
<mo>⋮</mo>
<msub>
<mi>F</mi>
<mi>S</mi></msub></math>

```

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="block">
<msub>
<mi>B</mi>
<mi>N</mi></msub>
<mo>=</mo>
<mo>(</mo>
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>C</mi></msub>
<mo>+</mo>
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>P</mi></msub>
<mo>+</mo>
<msub>
<mi>N</mi>
<mrow>
<mi>D</mi>
<mi>C</mi></mrow></msub>
<mo>)</mo>
<mo>⋮</mo>
<msub>
<mi>F</mi>
<mi>S</mi></msub></math>

```

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="block">
<msub>
<mi>B</mi>
<mi>N</mi></msub>
<mo>=</mo>
<mfrac>
<mn>1</mn>
<mrow>
<mi>⊂</mi>
<mo>⋮</mo>
<msub>
<mi>T</mi>
<mi>D</mi></msub></mrow></mfrac></math>

```

</p>

```

<math xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<mi>⊂</mi>
<mo>⋮</mo>

```

```

<math>
\begin{aligned}
& \text{Bandwidth} \cdot \text{Efficiency} \cdot \text{and} \cdot \text{also} \cdot \text{S/N} \cdot \text{Loss} \\
& \text{Nyquist Bandwidth} \\
& \text{Subcarrier Spacing} \\
& \text{Data Subcarriers} \\
& \text{Pilot Subcarriers} \\
& \text{Source Symbol Duration} \\
& \text{Not Occupied DC Subcarriers}
\end{aligned}


```


<p>Learn more about OFDM and it's most important parameters by checking out the corresponding experiment!</p>

7.1.2 Quellcode zur „Experiment“-Seite zum Thema OFDM

<h1>Calculation of WLAN IEEE 802.11g OFDM Parameters</h1>

<p>Determine the missing parameters for IEEE 802.11g (WLAN) in the table below by using the necessary formulas given in the corresponding tutorial to complete the parameter set of this common wireless transmission standard.</p>


```
<div class="table-wrapper">
  <table>
    <tr>
      <td style="text-align: center"><br>
<strong>Parameter</strong><br>
      <br></td>
      <td><br> <strong>value for IEEE 802.11g</strong><br> <br></td>
      <td style="text-align: center"><br>
<strong>Comment</strong><br>
      <br></td>
    </tr>
    <tr>
      <td style="text-align: center">Number of Subcarriers <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <mi>N</mi>
      </math>
      </td>
      <td style="text-align: center">64</td>
      <td></td>
    </tr>
    <tr>
      <td style="text-align: center">Number of Data Subcarriers <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <msub>
          <mi>N</mi>
          <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
            <mi>c</mi>
          </mrow>
        </msub>
      </math>
      </td>
      <td style="text-align: center">52</td>
      <td></td>
    </tr>
    <tr>
      <td style="text-align: center">Number of Pilot Subcarriers
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <msub>
          <mi>N</mi>
          <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
            <mi>p</mi>
          </mrow>
        </msub>
      </math>
```

```

        </td>
        <td style="text-align: center">4</td>
        <td></td>
    </tr>
    <tr>
        <td style="text-align: center">Number of Null Subcarriers <math
            xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                <msub>
                    <mi>N</mi>
                    <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
                        <mi>v</mi>
                    </mrow>
                </msub>
            </math>
        </td>
        <td style="text-align: center"><div class="formel">
            <div class="figure" align="center">
                
            </div>
            <span class="formeltext"><div class="figure-half">
                <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                    <mn>8</mn></math>
            </div></span>
        </div></td>
        <td style="text-align: center">
            <div class="formel">
                <div class="figure" align="center">
                    
                </div>
                <span class="formeltext"><div class="figure-half">
                    <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                        <msub>
                            <mi>N</mi>
                            <mi>v</mi></msub>
                            <mo>=</mo>
                            <mi>N</mi>
                            <mo>-</mo>
                            <mo>(</mo>
                            <msub>
                                <mi>N</mi>
                                <mi>p</mi></msub>
                                <mo>+</mo>
                                <msub>
                                    <mi>N</mi>
                                    <mi>c</mi></msub>
                                <mo>)</mo></math>
                        </div></span>
                    </div>
                </td>
            </tr>
            <tr>
                <td style="text-align: center">Discrete Length of GI <math
                    xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                        <msub>
                            <mi>N</mi>

```

```

        <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
          <mi>G</mi>
        </mrow>
      </msub>
    </math>
  </td>
  <td style="text-align: center">16</td>
  <td></td>
</tr>
<tr>
  <td style="text-align: center">GI Duration <math
    xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
      <msub>
        <mi>T</mi>
        <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
          <mi>G</mi>
        </mrow>
      </msub>
    </math>
  </td>
  <td style="text-align: center">
    <div class="formel">
      <div class="figure" align="center">
        
      </div>
      <span class="formeltext"><div class="figure-half">
        <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
          <mn>0</mn>
          <mo>,</mo>
          <mn>8</mn>
          <mo>&#xA0;</mo>
          <mi>&#x3BC;</mi>
          <mi>s</mi></math>
        </div></span>
      </div>
    </td>
  <td style="text-align: center">
    <div class="formel">
      <div class="figure" align="center">
        
      </div>
      <span class="formeltext"><div class="figure-half">
        <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
          <msub>
            <mi>T</mi>
            <mi>G</mi></msub>
            <mo>=</mo>
            <msub>
              <mi>N</mi>
              <mi>G</mi></msub>
            <mo>&#xD7;</mo>
            <msub>
              <mi>t</mi>
              <mi>s</mi></msub>
            <mo>=</mo>

```

```

<math>
<mfrac>
<mrow>
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>G</mi></msub>
<mo>⋅</mo>
<msub>
<mi>T</mi>
<mi>s</mi></msub></mrow>
<mi>N</mi></mfrac></math>
</div></span>
</div>
</td>
</tr>
<tr>
<td style="text-align: center">Source Symbol Duration <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<msub>
<mi>T</mi>
<mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
<mi>D</mi>
</mrow>
</msub>
</math>
</td>
<td style="text-align: center">
<div class="formel">
<div class="figure" align="center">

</div>
<span class="formeltext"><div class="figure-half">
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<mn>0</mn>
<mo>,</mo>
<mn>077</mn>
<mo>⋅</mo>
<mi>⋅</mi>
<mi>s</mi></math>
</div></span>
</div>
</td>
<td style="text-align: center">
<div class="formel">
<div class="figure" align="center">

</div>
<span class="formeltext"><div class="figure-half">
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<msub>
<mi>T</mi>
<mi>D</mi></msub>
<mo>=</mo>
<mfrac>
<mrow>
<mi>T</mi>

```



```

<mi>c</mi></msub></mfrac></math>
</div></span>
</div>
</td>
</tr>
<tr>
<td style="text-align: center">Symbol Duration <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<msub>
<mi>t</mi>
<mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
<mi>s</mi>
</mrow>
</msub>
</math>
</td>
<td style="text-align: center">
<div class="formel">
<div class="figure" align="center">

</div>
<span class="formeltext"><div class="figure-half">
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<mn>0</mn>
<mo>,</mo>
<mn>05</mn>
<mo>&#xA0;</mo>
<mi>&#x3BC;</mi>
<mi>s</mi></math>
</div></span>
</div>
</td>
<td style="text-align: center">
<div class="formel">
<div class="figure" align="center">

</div>
<span class="formeltext"><div class="figure-half">
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<msub>
<mi>t</mi>
<mi>s</mi></msub>
<mo>=</mo>
<mfrac>
<mrow>
<mi>T</mi>
<msub>
<mo>'</mo>
<mi>s</mi></msub></mrow>

```

```

<mi>G</mi></msub></mrow></mfrac></math>
</div></span>
</div>
</td>
</tr>
<tr>
<td style="text-align: center">Basic OFDM Symbol Duration <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<msub>
<mi>T</mi>
<mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
<mi>s</mi>
</mrow>
</msub>
</math>
</td>
<td style="text-align: center">
<div class="formel">
<div class="figure" align="center">

</div>
<span class="formeltext"><div class="figure-half">
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<mn>3</mn>
<mo>,</mo>
<mn>2</mn>
<mo>&#xA0;</mo>
<mi>&#x3BC;</mi>
<mi>s</mi></math>
</div></span>
</div>
</td>
<td style="text-align: center">
<div class="formel">
<div class="figure" align="center">

</div>
<span class="formeltext"><div class="figure-half">
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<msub>
<mi>T</mi>
<mi>s</mi></msub>
<mo>=</mo>
<mi>N</mi>
<mo>&#xD7;</mo>
<msub>
<mi>t</mi>
<mi>s</mi></msub></math>
</div></span>

```

```

        </div>
    </td>
</tr>
<tr>
    <td style="text-align: center">Total OFDM Symbol Duration <math
        xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <mi>T</mi>
        <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
            <mo>&#x2032;</mo>
        </mrow>
        <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
            <mi>s</mi>
        </mrow>
        </math>
    </td>
    <td style="text-align: center"><math
        xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <mn>4</mn>
        <mo>&#xA0;</mo>
        <mi>&#x3BC;</mi>
        <mi>s</mi></math></td>
</tr>
<tr>
    <td style="text-align: center">Bit Rate <math
        xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <msub>
            <mi>RB</mi>
            <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
                <mi>brutto</mi>
            </mrow>
        </msub>
        </math>
    </td>
    <td style="text-align: center">
        <div class="formel">
            <div class="figure" align="center">
                
            </div>
            <span class="formeltext"><div class="figure-half">
                <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                    <mn>78</mn>
                    <mo>&#xA0;</mo>
                    <mfrac>
                        <mrow>
                            <mi>M</mi>
                            <mi>b</mi>
                            <mi>i</mi>
                            <mi>t</mi></mrow>
                            <mi>s</mi></mfrac></math>
                </div></span>
            </div>
        </td>
    <td style="text-align: center">
        <div class="formel">
            <div class="figure" align="center">

```

```

height="30">
    
    <span class="formeltext"><div class="figure-half">
        <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
            <msub>
                <mi>R</mi>
                <mrow>
                    <mi>B</mi>
                    <mo>,</mo>
                    <mi>b</mi>
                    <mi>r</mi>
                    <mi>u</mi>
                    <mi>t</mi>
                    <mi>t</mi>
                    <mi>o</mi></mrow></msub>
                    <mo>=</mo>
                    <mfrac>
                        <mrow>
                            <msub>
                                <mi>N</mi>
                                <mi>c</mi></msub>
                                <mo>&#xD7;</mo>
                                <mi>n</mi></mrow>
                                <mrow>
                                    <mi>T</mi>
                                    <msub>
                                        <mo>'</mo>

```

```

<td style="text-align: center">Symbol Rate <math
  xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
  <msub>
    <mi>f</mi>
    <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
      <mi>s</mi>
    </mrow>
  </msub>
  </math></td>
<td style="text-align: center">
  <div class="formel">
    <div class="figure" align="center">
      
    </div>
    <span class="formeltext"><div class="figure-half">
      <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <mn>20</mn>
        <mo>&#xA0;</mo>
        <mfrac>
          <mrow>
            <mi>M</mi>
            <mi>S</mi>
            <mi>y</mi>
          </mrow>
          <mi>m</mi></mrow>
          <mi>s</mi></mfrac></math>
      </div></span>
    </div>
  </td>
<td style="text-align: center">
  <div class="formel">
    <div class="figure" align="center">
      
    </div>
    <span class="formeltext"><div class="figure-half">
      <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <msub>
          <mi>f</mi>
          <mi>s</mi></msub>
          <mo>=</mo>
          <mfrac>
            <mn>1</mn>
            <msub>
              <mi>t</mi>
              <mi>s</mi></msub></mfrac></math>
        </div></span>
      </div>
    </td>
  </tr>
  <tr>
    <td style="text-align: center">Subcarrier Spacing <math
      xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
        <msub>
          <mi>F</mi>
          <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">

```

```

        <mi>s</mi>
      </mrow>
    </msub>
  </math></td>
  <td style="text-align: center">
    <div class="formel">
      <div class="figure" align="center">
        
      </div>
      <span class="formeltext"><div class="figure-half">
        <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
          <mn>312</mn>
          <mo>,</mo>
          <mn>5</mn>
          <mi>k</mi>
          <mi>H</mi>
          <mi>z</mi>
        </math>
      </div></span>
    </div>
  </td>
  <td style="text-align: center">
    <div class="formel">
      <div class="figure" align="center">
        
      </div>
      <span class="formeltext"><div class="figure-half">
        <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
          <msub>
            <mi>F</mi>
            <mi>s</mi></msub>
            <mo>=</mo>
            <mfrac>
              <mn>1</mn>
              <msub>
                <mi>T</mi>
                <mi>s</mi></msub>
            </mfrac>
          </math>
        </div></span>
      </div>
    </td>
  </tr>
  <tr>
    <td style="text-align: center">Bandwidth Efficiency <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
      <mi>&#x03B2;</mi>
    </math></td>
    <td style="text-align: center">
      <div class="formel">
        <div class="figure" align="center">
          
        </div>
        <span class="formeltext"><div class="figure-half">

```

```

                                <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                                <mfrac>
                                <mn>4</mn>
                                <mn>5</mn></mfrac></math>
                                </div></span>
                                </div>
                                </td>
                                <td style="text-align: center">
                                <div class="formel">
                                <div class="figure" align="center">
                                
                                </div>
                                <span class="formeltext"><div class="figure-half">
                                <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                                <mi>&#x3B2;</mi>
                                <mo>=</mo>
                                <mfrac>
                                <msub>
                                <mi>T</mi>
                                <mi>s</mi></msub>
                                <mrow>
                                <msub>
                                <mi>T</mi>
                                <mi>s</mi></msub>
                                <mo>+</mo>
                                <msub>
                                <mi>T</mi>
                                <mi>G</mi></msub></mrow></mfrac></math>
                                </div></span>
                                </div>
                                </td>
                                </tr>
                                <tr>
                                <td style="text-align: center">Nyquist Bandwidth <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                                <msub>
                                <mi>B</mi>
                                <mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
                                <mi>n</mi>
                                </mrow>
                                </msub>
                                </math></td>
                                <td style="text-align: center">
                                <div class="formel">
                                <div class="figure" align="center">
                                
                                </div>
                                <span class="formeltext"><div class="figure-half">
                                <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
                                <mn>17</mn>
                                <mo>,</mo>
                                <mn>5</mn>
                                <mi>M</mi>

```

```

<mi>H</mi>
<mi>z</mi></math>
</div></span>
</div>
</td>
<td style="text-align: center">
<div class="formel">
<div class="figure" align="center">

</div>
<span class="formeltext"><div class="figure-half">
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<msub>
<mi>B</mi>
<mi>N</mi></msub>
<mo>=</mo>
<mo>(</mo>
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>C</mi></msub>
<mo>+</mo>
<msub>
<mi>N</mi>
<mi>P</mi></msub>
<mo>)</mo>
<mo>&#xD7;</mo>
<msub>
<mi>F</mi>
<mi>s</mi></msub></math>
</div></span>
</div>
</td>
</tr>
<tr>
<td style="text-align: center">Nyquist Bandwidth with DC
Subcarrier <math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<msub>
<mi>B</mi>
<mrow class="MJX-TeXAtom-ORD">
<mi>n</mi>
</mrow>
</msub>
</math>
</td>
<td style="text-align: center">
<div class="formel">
<div class="figure" align="center">

</div>
<span class="formeltext"><div class="figure-half">
<math
xmlns="http://www.w3.org/1998/Math/MathML">
<mn>17</mn>
<mo>,</mo>
<mn>8</mn>

```



```

<mi>M</mi>
<mi>H</mi>
<mi>z</mi></math>
</div></span>
</div>
</td>
<td style="text-align: center">
  <div class="formel">
    <div class="figure" align="center">
      
    </div>
    <span class="formeltext"><div class="figure-half">
      <math>
        <msub>
          <mi>B</mi>
          <mi>N</mi></msub>
          <mo>=</mo>
          <mo>(</mo>
          <msub>
            <mi>N</mi>
            <mi>C</mi></msub>
          <mo>+</mo>
          <msub>
            <mi>N</mi>
            <mi>P</mi></msub>
          <mo>+</mo>
          <msub>
            <mi>N</mi>
            <mrow>
              <mi>D</mi>
              <mi>C</mi></mrow></msub>
          <mo>)</mo>
          <mo>&#xD7;</mo>
          <msub>
            <mi>F</mi>
            <mi>s</mi></msub></math>
        </div></span>
      </div>
    </td>
  </tr>
</tr>
<td style="text-align: center"><br>
<strong>Parameter</strong><br>
  <br></td>
  <td style="text-align: center"><br> <strong>value
    for IEEE 802.11g</strong><br> <br></td>
  <td style="text-align: center"><br>
<strong>Comment</strong><br>
  <br></td>
</tr>
</table>
</div>
<br>
<br>

```

7.1.3 Quellcode zur „Tutorial“-Seite zum Thema Übertragungsspektrum

```

<p>
    One of the most important aspects in communication technology is
    keeping the signal, that has to be transmitted, within the assigned
    bandwidth. This is essential to prevent the transmission from being
    disturbed by its spectral neighbors and the other way around. This is
    where pulseforming has to be taken into consideration. A scale for the
    quality of a transmission is its Nyquist Bandwidth. In case of a QPSK
    modulated signal with a datarate of 1 Mbit/s the Nyquist Bandwidth is
    0.5 MHz. This bandwidth is the minimum that is necessary for the
    transmission. Otherwise the signal can not be detected properly anymore
    in the receiver.
    <br> <br>
    The following picture shows a
    rectangular pulse created by a signal source with a transmission rate
    of 1 MBit/s.
</p>
<br>

<div class="figure-half">
    
</div>
<div class="caption">Signal from the source before modulation and
    pulseshaping over time</div>
<br>
<br>

<p>
    Due to the modulation of the signal with a QPSK modulator, the length
    of the single pulses is 2 times of one bit duration. As you may know, sharp
    edged signals
    contain sine and cosine waves with high frequencies and high amplitude.
    This is why the spectrum of a signal, which consists of rectangular
    pulses, shows a extraordinary high powers beyond the Nyquist Bandwidth
    (-0.25 MHz - 0.25 MHz in this case). The necessary bandwidth of a
    transmission can be manipulated by the application of filters. <br>
    <br> Have a look at the images in the slideshow below to see the
    differences between rectangular shaped pulses, halfsine shaped pulses,
    sinc shaped pulses and root raised cosine pulses.
</p>

<br>
<br>

<div class="figure-full">
    <div class="slideshow">
        
        
        
        

        <button class="slideshow-button-left" onclick="plusSlides(-1,
0)">&#10094;</button>
        <button class="slideshow-button-right" onclick="plusSlides(1,
0)">&#10095;</button>
    </div>
</div>
<div class="caption">Signal over time and transmission spectrum for systems with
different pulseshaping filters</div>
<br>

<br>

<p>
    Having a look at the graphs of a transmission with halfsine shaped
    pulses you can see, that the central part of the spectrum may indeed
    require a larger bandwidth in comparison to a rectangular pulseshaped
    transmission, but in the area beyond -1 MHz and 1 MHz the powers fade
    away much earlier. Changing the shape of the basic pulse into a sinc
    shape nearly completely removes signal parts beyond  $\pm 0.5$  MHz around
    the center of the signal. But this removal of high frequency signal
    components can lead to intersymbol interference (ISI)</strong>
    when filter length is limited.

    <br>

    Another option for a pulse-shaping filter is a
    filter with a root raised cosine (RRC) frequency
    response. that provides signal pulses. These filters are the most
    common filters in communication technology because they fulfill the
    criteria for a intersymbol interference (ISI) free transmission.<br>
    <br> By tuning a digital root raised cosine filter in filter
    length the result can be enhanced much further. Check out the
    corresponding experiment and find out how different pulseshapers and a
    variation of their parameters affect the transmission.

</p>

<script>
    var slideIndex = [ 1, 1, 1 ];
    var slideId = [ "mySlides1" ]
    showSlides(1, 0);
    showSlides(1, 1);
    showSlides(1, 2);

    function plusSlides(n, no) {
        showSlides(slideIndex[no] += n, no);
    }

    function showSlides(n, no) {
        var i;
        var x = document.getElementsByClassName(slideId[no]);
        if (n > x.length) {
            slideIndex[no] = 1

```

```
    }  
    if (n < 1) {  
        slideIndex[no] = x.length  
    }  
    for (i = 0; i < x.length; i++) {  
        x[i].style.display = "none";  
    }  
    x[slideIndex[no] - 1].style.display = "block";  
    }  
</script>
```

7.1.4 Quellcode zur „Experiment“-Seite zum Thema Übertragungsspektrum

```

<h2>1. Launch the Simulation</h2>
<p>Click on the launch button to start the simulation. The block
    diagram and some control windows will show up.</p>
<br>
<div class="figure-full">
    
</div>
<div class="caption">Block diagram of the simulation</div>
<br>
<br>
<br>
<h2>2. Open Spectrum Analyzer</h2>
<p>Right click on the signal path between the sender pulse shaper
    and the plus symbol where the noise is added. "Select Spectrum
    Analyzer". The analyzer window that shows the transmission spectrum
    will show up.</p>
<br>
<div class="figure-half">
    
</div>
<div class="caption">Spectrum of the transmitted signal</div>
<br>
<br>
<h2>3. Vary the pulse shaper settings and monitor the transmission
    spectrum</h2>
<p>By right clicking on the pulse shaper and the selection of
    "select system" in the appearing menu the filter can be changed. Try
    some different filters and watch how they affect the transmission
    spectrum. Left clicking on the pulseshaper opens a control window where
    filter parameters can be adjusted.</p>

```

7.1.5 Quellcode zur „Illustration“-Seite zum Thema Übertragungsspektrum

```

<div class="table-wrapper">
  <table class="noborder">
    <tr>
      <td style="vertical-align: top; width: 50%">
        <div class="figure-half">
          
          </div>
          <div class="caption-center">Basic pulse created by a
rectangle
          <u>pulseformer</u></div>
        </td>
        <td style="vertical-align: top">
          <div class="figure-half">
            
            </div>
            <div class="caption-center">Power-density spectrum of a
rectangle shaped Symbol</div>
          </td>
        </tr>
        <tr>
          <td style="vertical-align: top; width: 50%">
            <div class="figure-half">
              
            </div>
            <div class="caption-center">Amplitude over time plot of
a
            <u>pulseformer</u>
            <div class="figure-half">
              
            </div>
            <div class="caption-center">Power-density spectrum of a
            <u>halfsine</u> shaped Symbol</div>
          </td>
          <td style="vertical-align: top; width: 50%">
            <div class="figure-half">
              
            </div>
            <div class="caption-center">Amplitude over time plot of
a

```

<u>pulseformer</u>	Symbol after being filtered by a <u>sinc</u>-shaped
<u>sinc</u>	shaped Symbol
domain" domain"> a cosine-shaped	Power-density spectrum of a Amplitude over time plot of Symbol after being filtered by a root-raised-
pulse" shaped pulse">	Power-density spectrum of a root-raised-cosine shaped Symbol

7.1.6 Quellcode zur „Tutorial“-Seite zum Thema Augendiagramm und Konstellationsdiagramm

```

<div class="figure-half">
  
</div>
<div class="caption">Bit error rate meter</div>
<br>
<br>

<p>
  When it comes to evaluating the quality of a digital transmission, the
  <strong>bit error rate</strong> can be utilized. To measure the
  <strong>BER</strong>,
  a known testsignal has to be transmitted and compared with the received
  data. The ratio of wrong bits in the receiver is the mentioned bit
  error rate. Another way to get information about the quality of a
  transmission is the monitoring of the so called <strong>eye-
  pattern</strong>.
  The eye-pattern can be described as a oszilloscope that keeps showing
  all traces. Executing such a measurement with the received signal of a
  digital transmission will produce a picture that contains all possible
  condition transitions. A transmission with a S/N ratio of 10 dB leads
  to the following result:

</p>
<br>
<br>

<div class="figure-half">
  
</div>
<div class="caption">Eye-Pattern of a digital transmission with a
  signal to noise ratio of 16 dB</div>
<br>
<br>

<p>
  As you can see, the eye-pattern reveals a clearly visible eye opening
  without any signal paths interfering with eachother in the area of
  detection sampling (center part of the diagram). The contained noise in
  the received signal causes the traces of the eye pattern to slightly
  vary in amplitude. Nevertheless, a transmission with this eye-pattern
  is what can be called a extraordinary good transmission due to the
  clearly visible eye opening. Having a look at the measured BER of this
  system confirms the estimated quality. The BER of this transmission is
  approximately 0, so all sent bits will be detected correctly. <br>
  <br> Decreasing the signal to noise ratio of the transmission
  system affects both the bit error rate and the appearance of the
  eye-pattern.

</p>
<br>

```



```

<div class="figure-full">
  <div class="slideshow">
          
    <button class="slideshow-button-left" onclick="plusSlides(-1,
0)">&#10094;</button>
    <button class="slideshow-button-right" onclick="plusSlides(1,
0)">&#10095;</button>
  </div>
</div>
<div class="caption">Eye-pattern and constellation diagram for
  various signal qualities</div>
<br>

```

<p>

The `slideshow` above contains eye patterns and constellation diagrams of transmissions which differ in E_b/N_0 ratio or `pulseshaping` filter. If they are compared with each other the diagrams show obvious differences. Some of them, for example a transmission with a E_b/N_0 ratio of 6 dB show a wide spread of the single traces and even some traces in the center area of the diagram. These traces are the result of the relatively higher noise in the signal and can lead to a wrong detection in the receiver. This is why the BER of a transmission with a E_b/N_0 ratio of 6 dB was measured as $2.4E-03$.

Knowing this, only a short look at the picture which shows the eye-pattern and the constellation diagram of a transmission with a signal to noise ratio of -2dB should be enough to understand that this must be a quite bad transmission. The eye-pattern is barely recognizable and absolutely no eye opening can be seen. Also the dots of the constellation diagram are spread all over the diagram. But interestingly, even though the eye-pattern looks this kind of bad, the BER of this system is with 0.13 not as bad as you maybe would expect.

</p>

<p>

Check out the corresponding experiment to generate some eye-patterns and constellation diagrams on your own and have a look at the illustration-page for more vividly content.

</p>

<script>

```
var slideIndex = [ 1, 1, 1 ];
var slideId = [ "mySlides1" ]
showSlides(1, 0);
showSlides(1, 1);
showSlides(1, 2);

function plusSlides(n, no) {
    showSlides(slideIndex[no] += n, no);
}

function showSlides(n, no) {
    var i;
    var x = document.getElementsByClassName(slideId[no]);
    if (n > x.length) {
        slideIndex[no] = 1
    }
    if (n < 1) {
        slideIndex[no] = x.length
    }
    for (i = 0; i < x.length; i++) {
        x[i].style.display = "none";
    }
    x[slideIndex[no] - 1].style.display = "block";
}
</script>
```

7.1.7 Quellcode zur „Experiment“-Seite zum Thema Augendiagramm und Konstellationsdiagramm

<h2>1. Launch the Simulation</h2>

<p>Click on the launch button to start the simulation. The block diagram and some control windows will show up.</p>

<div class="figure-full">

</div>

<div class="caption">Block diagram of the simulation with a bit error meter and the S/N ratio control window</div>

<h2>2. Open the oscilloscope</h2>

<p>Click on the path of the receive signal between the receive filter and the sampler to open a oscilloscope. The diagram shows the eye pattern of the signal after passing the AWGN channel, so noise is included.</p>

<div class="figure-half">

</div>

<div class="caption">Eye-pattern of the received signal</div>

<h2>3. Open the constellation diagram</h2>

<p>Right click on the path of the receive signal between the receive filter and the sampler. Choose the constellation diagram.</p>

<div class="figure-half">

</div>

<div class="caption">Constellation diagram</div>

<h2>4. Vary the S/N ratio and monitor the eye-pattern</h2>

<p>Try different signal to noise ratios and watch how they affect the eye-pattern. Also have a look at the bit error rate.</p>

<div class="figure-half">

</div>

<div class="caption">Eb/N0 ratio controller</div>

<h2>5. Vary the pulseshaper and monitor the eye-pattern and constellation diagram</h2>

<p>Click on the "Simulation" button in the left top corner of the block diagram window. Choose "Setup" and select another pulse shaping

filter in the appearing window than a rectangular one.</p>

7.1.8 Quellcode zur „Illustration“-Seite zum Thema Augendiagramm und Konstellationsdiagramm

```

<div class="table-wrapper">
  <table class="noborder">
    <tr>
      <td style="vertical-align: top; width: 50%">
        <div class="figure-half">
          
        </div>
        <div class="caption-center">Eye-Pattern at -2 dB S/N
ratio
          which results in a BER of 0.13</div>
        </td>
        <td style="vertical-align: top">
          <div class="figure-half">
            
          </div>
          <div class="caption-center">Constellation diagram at -2
dB S/N
ratio.</div>
        </td>
      </tr>
      <tr>
        <td style="vertical-align: top; width: 50%">
          <div class="figure-half">
            
          </div>
          <div class="caption-center">Eye-Pattern at 0 dB S/N
ratio
            which results in a BER of 78E-3</div>
          </td>
          <td style="vertical-align: top">
            <div class="figure-half">
              
            </div>
            <div class="caption-center">Constellation diagram at 0
dB S/N
ratio.</div>
          </td>
        </tr>
        <tr>
          <td style="vertical-align: top; width: 50%">
            <div class="figure-half">
              
            </div>

```

```

ratio
        <div class="caption-center">Eye-Pattern at 2 dB S/N
        which results in a BER of 38E-3</div>
    </td>
    <td style="vertical-align: top">
        <div class="figure-half">
            
        </div>
        <div class="caption-center">Constellation diagram at 2
dB S/N
        ratio.</div>
    </td>
</tr>
<tr>
    <td style="vertical-align: top; width: 50%">
        <div class="figure-half">
            
        </div>
        <div class="caption-center">Eye-Pattern at 4 dB S/N
ratio
        which results in a BER of 12E-3</div>
    </td>
    <td style="vertical-align: top">
        <div class="figure-half">
            
        </div>
        <div class="caption-center">Constellation diagram at 4
dB S/N
        ratio.</div>
    </td>
</tr>
<tr>
    <td style="vertical-align: top; width: 50%">
        <div class="figure-half">
            
        </div>
        <div class="caption-center">Eye-Pattern at 6 dB S/N
ratio
        which results in a BER of 2.4E-3</div>
    </td>
    <td style="vertical-align: top">
        <div class="figure-half">
            
        </div>
        <div class="caption-center">Constellation diagram at 6
dB S/N
        ratio.</div>
    </td>
</tr>

```

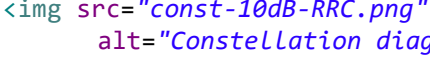
```

<!--neu ab hier-->

<tr>
  <td style="vertical-align: top; width: 50%">
    <div class="figure-half">
      
    </div>
    <div class="caption-center">Eye-Pattern at 8dB S/N ratio
which
      results in a BER of 0.12E-3</div>
    </td>
    <td style="vertical-align: top">
      <div class="figure-half">
        
      </div>
      <div class="caption-center">Constellation diagram at 8
dB S/N
      ratio.</div>
    </td>
  </tr>
  <tr>
    <td style="vertical-align: top; width: 50%">
      <div class="figure-half">
        
      </div>
      <div class="caption-center">Eye-Pattern at 10 dB S/N
ratio
      which results in a BER of
    </td>
    <td style="vertical-align: top">
      <div class="figure-half">
        
      </div>
      <div class="caption-center">Constellation diagram at 10
dB S/N
      ratio.</div>
    </td>
  </tr>
  <tr>
    <td style="vertical-align: top; width: 50%">
      <div class="figure-half">
        
      </div>

```

| | |
|---------------------------------------|--|
| <p>ratio</p> <p>rectangle-shaped.</p> | <pre> <div class="caption-center">Eye-Pattern at 10 dB S/N with a <u>halfsine</u>-shaped <u>pulseshaper</u> instead of a The BER is not affected by the <u>pulseshape</u>.</div> </td> <td style="vertical-align: top"> <div class="figure-half"> </div> <div class="caption-center">Constellation diagram at 10 dB S/N ratio with a <u>halfsine</u>-shaped <u>pulseshaper</u> instead of a rectangle-shaped. The BER is not affected by the <u>pulseshape</u>.</div> </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top; width: 30%; width: 50%"> <div class="figure-half"> </div> <div class="caption-center">Eye-Pattern at 10 dB S/N ratio rectangle-shaped. The with a <u>sinc</u>-shaped <u>pulseshaper</u> instead of a BER is not affected by the <u>pulseshape</u>.</div> </td> <td style="vertical-align: top"> <div class="figure-half"> </div> <div class="caption-center">Constellation diagram at 10 dB S/N ratio with a <u>sinc</u>-shaped <u>pulseshaper</u> instead of a rectangle-shaped. The BER is not affected by the <u>pulseshape</u>.</div> </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top; width: 30%; width: 50%"> <div class="figure-half"> </div> <div class="caption-center">Eye-Pattern at 10 dB S/N ratio </pre> |
|---------------------------------------|--|

| | |
|--------------------------------------|---|
| instead of a
<u>pulseshaper</u> . | with a root-raised-cosine-shaped <u>pulseshaper</u>
rectangle-shaped. The BER is not affected by the |
| |  <p>Constellation diagram at 10 dB S/N ratio with a RRC-shaped <u>pulseshaper</u> instead of a rectangle-shaped. The BER is not affected by the <u>pulseshaper</u>.</p> |

7.2 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1 Startseite des Webportals „labAlive“ (7) | 7 |
| Abbildung 2 Themengebietsauswahl im Webportal „labAlive“ (7) | 8 |
| Abbildung 3 Sinussignal mit einer Frequenz von 10 MHz | 10 |
| Abbildung 4 Spektrum eines Sinussignals mit einer Frequenz von 10 MHz | 10 |
| Abbildung 5 Resultat einer Addition von verschiedenen Sinusschwingung | 11 |
| Abbildung 6 Spektrum eines Signals mit zwei Sinusanteilen | 11 |
| Abbildung 7 Dreieckförmiges Signal mit einer Frequenz von 10 MHz | 12 |
| Abbildung 8 Spektrum eines dreieckförmigen Signals | 12 |
| Abbildung 9 Rechteckförmiges Signal mit einer Frequenz von 10 MHz | 13 |
| Abbildung 10 Spektrum eines rechteckförmigen Signals | 13 |
| Abbildung 11 Blockdiagramm einer Sender- Empfängerstrecke mit AWGN Kanal | 14 |
| Abbildung 12 Beispielhaftes Sendesignal ohne Rauschen | 15 |
| Abbildung 13 Weißes, gaußverteiltes Rauschsignal | 16 |
| Abbildung 14 Sendesignal nach Passage des AWGN-Kanalmodells | 16 |
| Abbildung 15 Programmcode der für die Messungen verwendeten Simulation | 19 |
| Abbildung 16 Quellsignal, gemessen mit dem Oszilloskop, gesichert mit der
simulationsinternen Speicherfunktion | 20 |
| Abbildung 17 Slideshow-Montage für rechteckförmige Signale | 21 |
| Abbildung 18 Quellcode der Slideshow | 22 |
| Abbildung 19 Quellcode der Tabellenkonstruktion für die „Illustration“-Seite | 25 |
| Abbildung 20 Slideshow auf der „Tutorial“-Seite zum Thema Pulseshaping | 26 |
| Abbildung 21 "Experiment" Seite für den Versuch zum Thema Pulseshaping | 27 |
| Abbildung 22 "Illustration"-Seite zum Thema Pulseshaping | 28 |
| Abbildung 23 Augendiagramm eines schwach gestörten Signals | 29 |
| Abbildung 24 Konstellationsdiagramm eines schwach gestörten QPSK modulierten Signals... | 30 |
| Abbildung 25 Slider der "Tutorial" Seite zum Thema Augendiagramme und
Konstellationsdiagramme | 32 |
| Abbildung 26 Versuchsbeschreibung zum Thema Augen- und Konstellationsdiagramm | 33 |
| Abbildung 27 „Illustration" Seite zum Thema Augen- und Konstellationsdiagramm | 34 |
| Abbildung 28 MathML Editor zur Erzeugung von MathML-Code für die Darstellung von
Formeln in HTML (5) | 36 |
| Abbildung 29 Beispielhafter MathML Code | 36 |
| Abbildung 30 Code für die „Mouse-Over“ Funktionalität | 37 |
| Abbildung 31 „Tutorial"-Seite des Themengebiets OFDM | 38 |
| Abbildung 32 Übungsaufgabe der OFDM-„Experiment"-Seite mit verdeckten Lösungen | 39 |
| Abbildung 33 Übungsaufgabe der OFDM-„Experiment"-Seite mit aufgedeckter Lösung | 40 |

7.3 Literaturverzeichnis

1. **Kammeyer, Karl-Dirk.** *Nachrichtentechnik*. Wiesbaden : B. G. Teubner, 2004.
2. **Martin, Meyer.** *Kommunikationstechnik: Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung*. Braunschweig : Vieweg & Sohn, 1999.
3. **Proakis, John G.** *Digital Communications*. s.l. : McGraw Hill Education, 2018.
4. [Online] <https://wiki.selfhtml.org/wiki/MathML>.
5. **Nolde, Dominic.** *Paradigm Examples of Online Experiments for a Virtual Communications Lab*. 2018.
6. [Online] <https://demo.wiris.com/mathtype/en/developers.php>.
7. [Online] <https://www.etti.unibw.de/labalive/>.
8. **Proakis, John G.** *Fundamentals of Communication Systems*. Harlow : Pearson Education, 2014.