

Informationsübertragung I

Frank Bättermann, 16.03.2008

Elektrische Grundlagen

Spannung

Bezeichnung für die Ladungsdifferenz eines elektrischen Leiters gegenüber eines Referenzpotentials. Verbindet man zwei unterschiedliche Potentiale (Ursache) entsteht Stromfluss (Wirkung).

Elektrisches Feld

Eine gerichtete Größe, die sich aus dem Ladungsunterschied zweier Punkte und deren Abstand zusammensetzt.

Strom

Gerichtete Bewegung von Elektronen. Ausgedrückt wird die Größe bspw. als bewegte Ladungsmenge (Anzahl der Elektronen) pro Zeiteinheit.

Wechselstrom

Strom, der periodisch seine Richtung Flussrichtung ändert. Neben der Frequenz ist die Wellenform (z.B. sinusförmig) eine wichtige Kenngröße.

Skin-Effekt

Ist bei Gleichstrom die Stromdichte über den gesamten Leiterquerschnitt homogen, so steigt der Scheinwiderstand eines von Wechselstrom durchflossenen Leiters bei steigender Frequenz. Das sich ändernde Magnetfeld induziert Wirbelströme innerhalb des Leiters, die, aufgrund

höherer Feldliniendichte in der Mitte, den Strom in Richtung der Leiteroberfläche konzentrieren. Der effektive Querschnitt sinkt.

Elektromagnetismus

Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein ringförmiges Magnetfeld. Es also orthogonal zur Stromrichtung und damit dem elektrischen Feld.

Transversale Welle

Welle deren Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht. Einfache Beispiele sind die Schwingungen der Wasseroberfläche, wenn man einen Stein in einen See wirft, oder der Ausschlag einer Stoffdecke beim Ausschütteln.

Elektromagnetische Welle

Eine Transversalwelle, die durch Verkettung ihrer Komponenten, dem elektrischen und magnetischen Feld, entsteht. Sie sind ohne Medium, also im freien Raum, und unabhängig von ihrer Frequenz mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitungsfähig. Die exakte Beschreibung ist durch die Maxwell'schen Gleichungen möglich.

Wellenwiderstand

Eigentlich Wellenimpedanz. Verhältnis der den Komponenten einer sich ausbreitenden Welle zueinander. Der Freiraumwellenwiderstand beträgt etwa 376 Ohm.

Wellenlänge

Länge einer vollen Schwingung, ausgedrückt in Metern. Sie ist der Quotient von Lichtgeschwindigkeit und Frequenz. Bei der Wellenlänge einer elektromagnetischen Schwingung spricht man von λ .

Feldstärke

Summe der elektrischen und magnetischen Feldstärke gemessen in V/m. Wenn eine elektromagnetische Welle in einer Antenne mit einer wirksamen Länge von einem Meter eine Spannung von einem Volt erzeugt spricht man von einer Feldstärke von 1 V/m. Gebräuchlicher sind jedoch Angaben im mV- oder μ V-Bereich.

Polarisation

Orientierung der elektrischen Feldlinien gegenüber der Erdoberfläche. Ist diese zeitlich konstant so spricht man von horizontaler oder vertikaler Polarisation. Anderenfalls von links- oder rechtszirkulär. Um den ungedämpften Empfang der gesendeten Wellen zu ermöglichen, müssen Polarisationsart und -richtung der Sende- und Empfangsantennen übereinstimmen.

Antennen

Vorrichtung zur Umwandlung eines hochfrequenten Wechselstromes in eine elektromagnetische Welle. Idealerweise ist diese Wirkung reziprok, praktisch werden je nach Einsatzzweck und Umgebung jedoch verschiedene Sende- und Empfangsantennen eingesetzt.

Sie besitzen allgemein, abhängig von ihrer Bauform, eine Resonanzfrequenz und ein charakteristisches Abstrahlverhalten.

Isotroper Strahler

Grundform einer Antenne, Punktstrahler. Als praktische Annäherung gilt der Kugelstrahler. Die Feldstärke ist in jeder Richtung identisch. Ihre Kennwerte werden bei der Definition verschiedener Einheiten genutzt.

Antennengewinn

Vergleich der max. Strahlungsdichte einer verlustbehafteten Antenne mit der Referenz des idealisierten isotropen Strahlers. Einheit ist dBi.

Richtfaktor

Verhältnis der maximalen Strahlungsdichte einer als verlustfrei angenommenen Antenne zu der eines isotropen Strahlers bei gleicher Polarisation.

Hertzscher Dipol

Ein Linearstrahler mit einer Länge unter $\lambda/4$. Selten auch als Bezugsantenne mit einem Richtfaktor von 1,5 (Gewinn 1,73 dBi = 1 dBh) genutzt.

Eine bildhafte Darstellung ist die eines Schwingkreises aus Induktivität (alle Windungen abgewickelt) und Kapazität (Fläche an den Leiterenden als Platten) resultierend in einem geraden Leiter.

Wirkungsgrad

Die durch eine Antenne abgestrahlte Leistung liegt unter der aufgenommenen. Es entstehen Verluste aufgrund von Zuleitungswiderständen und Absorptionen in Dielektrika.

Wirkfläche

Eine Antenne entnimmt der aufgenommenen Welle Leistung. Diese steht in direktem Verhältnis zur (fiktiven) Antennenwirkfläche. (besser???)

EIRP

Abkürzung für Equivalent Isotropically Radiated Power – effektive isotrope Strahlungsleistung. Sie gibt an mit welcher Leistung ein isotroper Strahler versorgt werden müsste, um die gleiche Feldstärke hervorzurufen wie eine Richtantenne in der Hauptstrahlungsrichtung. Angegeben wird sie in Watt und setzt sich auch dem Antennengewinn (dBi) und der Sendeleistung (dBm) zusammen.

Gruppenantennen

Kombinationen von mehreren Dipolen erzielen durch die Interferenzen der Feldstärken eine höhere Richtwirkung. Ein prominentes Beispiel war die früher weit verbreitete Yagi-Antenne zum Empfang terrestrischer Fernsehsignale.

Leistungsverstärker

In der Sendekette sind Leistungsverstärker vor der Antenne das letzte Glied. Hier findet meist eine hohe Stromverstärkung (Emitterfolger) statt um die gewünschte Sendeleistung zu liefern.

Klirrfaktor

Das Verhältnis des Effektivwertes aller Oberwellen (erzeugt durch Nichtlinearitäten) zum Effektivwert des Gesamtsignals.

Linearisierung

Man versucht das Verstärker-Verhalten von „sicheren“ Bauelementen, wie hochwertigen Widerständen, abhängig zu machen. Es wird so konstruiert, dass der Verstärkungsfaktor des „offenen“ Verstärkers möglichst hoch ist, um die „Überschüssige“ zur Linearisierung durch Gegenkopplung nutzen zu können. Hierbei wird ein Teil der Ausgangsgröße auf den invertierenden Eingang geführt. Es ist zu beachten dass unter allen Umständen eine Phasenreserve von einigen zehn Grad eingehalten wird. Erreicht der Verstärkerausgang eine Phasenverschiebung von 180° , so wird aus der Gegenkopplung eine Mitkopplung. Diese führt zu unkontrolliertem Schwingen und (meist) der Zerstörung des Verstärkers.

Halbleiter vs. Röhre

Bei Höchsthäufigkeiten und gleichzeitig hoher Leistung sind die Schaltfrequenzen von Elektronenröhren nach wie vor konkurrenzlos. Aufgrund der Effizienz, Robust- und Wartungsfreiheit von Halbleitern sind diese aber weiterhin auf dem Vormarsch.

Class A

Eintakt- oder Gegentakt-Endstufe, bei der Ru-

hestrom dem maximalen Ausgangsstrom entspricht. Hohe Linearität, aber geringer Wirkungsgrad von max. 25%. Die Gesamtlast der Schaltung für die Stromversorgung ist konstant.

Class B

Gegentakt-Verstärker ohne Ruhestrom. Dadurch bedingt entstehen sog. Übernahmeverzerrungen in der Nähe des Nulldurchgangs. Bei hohen Signalfrequenzen fallen diese jedoch immer weniger ins Gewicht. Hohe Effizienz von über 70% bei Volllaststeuerung.

Class AB

Gegentakt-Verstärker mit geringem Ruhestrom. Benötigt thermische Kompensation, erzeugt dafür jedoch, bei ähnlich gutem Wirkungsgrad wie der reine Class B-Verstärker, erheblich weniger Verzerrungen.

Class C

Eintakt-Verstärker ohne Ruhestrom, mit Schwingkreis-Last. Erzeugt starke Oberschwingungen und kann deswegen nur als Schmalbandverstärker eingesetzt werden. Dafür wird eine sehr hohe Effizienz von bis zu 90% erreicht.

Class D & E

Aufgrund des starken Oversamplings für HF-Anwendungen derzeit nicht geeignet.

Analoge Modulationsverfahren

Amplitudenmodulation (AM)

Die Information spiegelt sich in der Trägeramplitude wider. Im Spektrum entstehen durch die Multiplikation der beiden Signale ein unteres (USB) links sowie ein oberes Seitenband (OSB) rechts des Trägers. Diese entsprechen dem Spektrum des Nutzsignals, wobei das USB an horizontal gespiegelt ist. Um die benötigte Bandbreite für die Übertragung des Signals zu verringern kann ein hilberttransformiertes Signal hinzu addiert werden, wodurch lediglich ein Seitenband mit doppelter Amplitude ver-

bleibt. Zur Steigerung Leistungseffizienz kann u.U. der Träger unterdrückt werden.

Modulation: die Multiplikation der Signale kann bspw. mit Hilfe der exponentiell verlaufenden Kennlinie einer Halbleiter-Diode vorgenommen werden.

Demodulation: Hüllkurvendetektor (inkohärent)

Phasenmodulation (PM)

Die Information wird in Verschiebungen der Trägerphase „verpackt“. Es können nur sich ändernde Eingangssignale übertragen werden, ein Rechtecksignal würde zum Beispiel lediglich durch einen Phasensprung des Trägers im Schaltmoment dargestellt.

Frequenzmodulation (FM)

Die Frequenz des Trägers wird analog dem Nutzsignal variiert. Würde man das Spektrum über einen infinitesimal kleinen Zeitraum betrachten, so würde ein Dirac-Impuls analog dem Modulationssignal parallel verschoben werden. Die FM ist das Integral der PM. Sie ist störungsresistenter und Bandbreiten-effizienter als die AM.

Modulation: Schwingkreis in dem zu dessen „Verstimmung“ Kapazitätsdioden verwendet werden oder durch Vorschalten eines Integrators (z.B. mit Operationsverstärker) vor einer PM.

Demodulation: ebenfalls Schwingkreis (Ausgangsamplitude schwankt bei Frequenzabweichung); PLL

Amplituden-, Phasen- und Frequenzhub

Maximale Abweichung der Modulationsgröße. Beispiel FM: Differenz der max. und min. Trägerfrequenz / 2.

Modulationsgrad

Verhältnis der maximalen Änderung der informationstragenden Größe eines Signals zur dessen absoluten Größe. Beispiel AM: max. Amplitudenänderung / Amplitude des Trägers. Ein zu hoher Modulationsgrad bedeutet bei AM

der Verlust der Träger Frequenz, bei FM übermäßiger Bandbreitenbedarf.

Phase Locked Loop (PLL)

Regelkreis zur Synchronisation des Empfängers mit dem Trägersignal. Es wird versucht der Frequenz und Phase des Empfangssignals zu folgen. Da dieses mit dem Ausgang eines VCOs verglichen wird, kann dessen Steuersignal auch bereits als Demodulations-Ergebnis einer PM gesehen werden. Innerhalb der PLL muss zur Verminderung des Rauschens (nach Phasendiskriminator) und zur Unterdrückung einer eventuellen Schwingneigung (auf Regelfrequenz) eine Tiefpass eingesetzt werden.

Quadratur-Modulator

Diese Möglichkeit der Modulation ermöglicht es bei gleich bleibender Bandbreite die doppelte Information in ein Sendesignal zu verpacken – je eine Hälfte in den Real- (Modulation mit Cosinus-Träger) und den Imaginäranteil (Modulation mit Sinus-Träger). Das Ausgangssignal entspricht der Addition der beiden einzelnen Modulationsergebnisse und besitzt nun die doppelte Frequenz. Man könnte das Signal also auch als Addition zweier Amplitudenmodulationen mit jeweils 90° verschobenen Trägern beschreiben.

Impuls-Formung

Um die zeitdiskreten Symbole übertragen zu können, müssen sie in zeitkontinuierliche Impulse umgewandelt werden.

Matched-Filter

Ein der Impulsformung angepasster Empfangsfilter reduziert die Rauschleistung und ermöglicht so eine bessere Detektion.

ISI (inter symbol interference)

Ergebnis von Laufzeitproblemen bei der Übertragung von Symbolen. Nach der Faltung des Empfangssignals mit dem Matched-Filter sollen zum Zeitpunkt des Maximums des Symbolimpulses die Pegel des vorherigen und nächsten Symbols Null sein.

Rechteck-Impuls

Theoretischer Impuls ohne praktische Anwendung aufgrund der (unendlich) hohen Bandbreite.

cos²-Impuls

Relativ geringes „Überschwingen“, jedoch sehr „spitzes“ Spektrum und damit schwer detektierbar.

Gauss-Impuls

Kein Ein- und Ausschwingen, aber ebenfalls „spitzes“ Spektrum.

si-Impuls

Zeitbereich wie Frequenzbereich des Rechteckimpulses und umgekehrt. Theoretisch ideales Spektrum zur Detektion, jedoch wäre im Zeitbereich ein unendlich langer Impuls nötig.

Nyquist-Impuls mit cos-Rolloff

Ein Kompromiss zwischen zeitlicher Einschwingdauer und Breite im Frequenzbereich. Durch den Rolloff-Faktor kann diese modifiziert werden. Hieraus resultiert ein Rechteck mit cosinusförmig abfallenden Flanken. Dadurch gut detektierbar und trotzdem kurz.

Wurzel-Nyquist-Impuls

Die Impulsformung wird zu je einer „Hälfte“ auf die Sende- und Empfangsseite verlagert. Nach dem Matched-Filter erhält man im Empfänger mit den Nyquist-Impulsen ein Signal, das das erste Nyquist-Kriterium (zeitlich konstante Amplitude) erfüllt.

Signal-Übertragung

AWGN-Kanal

Idealisierter Übertragungskanal, der dem Signal lediglich Verzerrungen in Form von farblosem Rauschen („additive white gaussian noise“) hinzufügt. Dieses ist über das gesamte Spektrum gleich.

Rayleigh-Kanal

Übertragungskanal bei dem die Empfangsstärke schwankt. Beispielsweise durch Abschattung oder Addition zweier Empfangssignale von denen eines reflektiert wurde – also einen weiteren Weg zurücklegen musste, was am Empfänger einer Phasendrehung entspricht.

SNR (signal noise ratio)

Verhältnis der Rauschleistung N_0 zur Symbolleistung E_S , angegeben in dB ($10 \cdot \log(E_S/N_0)$).

Sample & Hold-Filter

Glied, das eine A/D-Wandler vorgeschaltet ist, um diesem während der benötigten Wandlungszeit einen gleichbleibenden Eingangsspiegel, das Sample, zur Verfügung zu stellen.

Nyquist-Shannon-Abtasttheorem

Zur Abtastung eines Signals mit der Frequenz f muss die Samplefrequenz mindestens $2 \cdot f$ betragen. Sonst entsteht mit dem Aliasing Verzerrungen die keine Rückwärtswandlung mehr ermöglichen. Tiefpass vorschalten.

Digitale Modulationsverfahren

Symbol

Fasst man mehrere Informationsbits zu einer Einheit, einem komplexwertigen Symbol, zusammen so kann die Übertragungsrate auf einem Kanal erhöht werden. Wenn man drei statt einem Bit zur Zeit übertragen möchte, müsste man bspw. bei AM in der Lage sein 8 verschiedene Amplituden eindeutig zu unterscheiden.

Mapping

Senderseitige Abbildung der Informationsbits auf Symbole. Das Gegenstück im Empfänger ist die Detektion (Entscheidung).

Mächtigkeit

Die Mächtigkeit des Symbolalphabets sagt aus, wie viele verschiedene Symbole enthalten sind. (eine Mächtigkeit von 16 entspricht bspw. 4Bit/Symbol)

Symbolfehlerrate

Aussage darüber auf wie viele übertragene Symbole ein falsch detektiertes kommt. Zu beachten ist, dass die Symbolfehlerrate nicht gleich der Bitfehlerrate ist. Durch geschickte Anordnung der Symbole im Signalraum kann der Fehler auf ein Bit begrenzt werden, was in den meisten Fällen durch eine Fehlerkorrektur auszugleichen ist.

Grey-Codierung

Abmachung, dass zwei aufeinander folgende Symbole sich lediglich in einem Bit unterscheiden

Signalraumkonstellation

In einer imaginären Gauss-Ebene werden den Symbolen Positionen mit jeweiligen Real- (I, „in-phase“) und Imaginäranteil (Q, „quadrature“) zugeordnet.

ASK (amplitude shift keying)

Symbole werden durch die unterschiedliche Amplitude des Trägers differenziert. (eindimensionale Modulationsart)

FSK (frequency shift keying)

Digitale Form der FM.

PSK (phase shift keying)

Der Träger hält eine gleich bleibende Amplitude. Symbole werden durch Phasenänderungen ausgedrückt. Mit steigender Anzahl derer bildet sich ein Kreis um den Koordinatenursprung der Signalraumkonstellation.

D-QPSK (differential quadrature psk)

Es wird immer die Differenz der Phasen des vorherigen und aktuellen Symbols übertragen. Im Empfänger wird das Aktuelle Symbol mit dem vorherigen konjugiert komplex multipliziert. Phasenabweichungen heben sich hierbei auf und es kann auf eine Phasenschätzung verzichtet werden. „Bezahlt“ wird dies allerdings mit erhöhtem Rauschen, was wiederum mit höherer Sendeleistung ausgeglichen werden muss.

O-QPSK (offset quadrature psk)

Bei diesem 4PSK-Verfahren wird der Nulldurchgang in der Signalraumkonstellation vermieden, wenn die Amplitude des Signals auch nicht vollkommen konstant bleibt. Das zweite Bit wird um einen halben Takt verschoben, so dass ein Symbolwechsel eigentlich einer Änderung des Real- und Imaginärteils nacheinander entspricht.

QAM (quadrature amplitude modulation)

Mit einem Quadraturmodulator werden sowohl I und Q-Teile des Trägers zur Modulation genutzt. In der Signalraumkonstellation sind die Symbole als „Gitternetz“ angeordnet.

4QAM entspricht physikalisch 4PSK/QPSK.

Wie bei jeder digitalen Modulation werden die Entscheidungsbereiche mit steigender Mächtigkeit immer kleiner. Also muss man hier mit höherer Sendeleistung (durch physikalische, politische und biologische Gegebenheiten gedeckelt) oder möglichst optimale Kanäle (AWGN) die SNR verbessern. Die Fehlerraten können des Weiteren durch verbesserte Fehlerkorrekturen verringert werden.

Praktisch lassen sich derzeit Mächtigkeiten bis zu 4096 bei einer SNR von 36dB erzielen (DVB-C2).