

Projektbericht für ETE491 Elektrotechnisches Projekt

Datenübertragung über Stromleitungen

Namen:	Alperen Öncül – Sude Nazlı Öztürk
Immatrikulationsnummern:	200504049 - 200504024
Betreuer/-in:	Prof. Dr. Mukden Uğur
Semester:	WiSe 2024-2025
Abgabedatum:	14.1.2025
Version:	1.1

Kurzfassung

Power Line Communication (PLC)-Systeme ermöglichen die Datenübertragung über Stromleitungen, die zur Übertragung oder Verteilung von Wechselstrom (AC) genutzt werden. Ursprünglich wurden PLC-Systeme für die elektrische Energieverteilung zur Sicherstellung der Kommunikation zwischen Kraftwerken, Umspannwerken und Verteilzentren eingesetzt, dann haben sich PLC-Systeme weiterentwickelt und heutzutage gibt es sowohl schmalbandige (NB-PLC) als auch breitbandige (BB-PLC) Technologien. Schmalbandige PLC eignet sich dank ihrer Robustheit und Zuverlässigkeit für Anwendungen mit niedrigen Datenraten und großer Reichweite, wie intelligente Messsysteme und Hausautomatisierung. Breitbandige PLC hingegen ermöglicht hohe Datenübertragungsraten und ist ideal für Anwendungen wie Heimnetzwerke und 4K-Streaming.

Die wichtige Komponente zur Realisierung von PLC-Systemen sind Filter, Modulatoren, Verstärker, Demodulatoren, Koppler und Mikrocontroller. Insbesondere Modulationstechniken wie Spread-Spectrum und Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) haben wesentlich zur Effizienz und Leistungsfähigkeit von Breitband-PLC-Systemen beigetragen. Trotz dieser Fortschritte stehen PLC-Systeme vor erheblichen Herausforderungen, die Rauschen, Dämpfung und Signalverzerrung im Übertragungsmedium sowie externe Faktoren wie variabler Netzwerkverkehr und Interferenzen mit anderen Kommunikationssystemen sind. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert fortschrittliche Techniken zur Rauschunterdrückung, Bandbreitenverwaltung und adaptiven Frequenzauswahl.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Eidesstattliche Erklärung	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
1. Einleitung.....	8
1.1 Grundlagen der PLC-Systemen.....	8
1.2 Schmalbandige PLC und Breitbandige PLC	9
1.2.1 Schmalbandige PLC	9
1.2.2 Breitbandige PLC	9
1.3 Anwendungsfälle und Anwendungen	10
1.3.1 PLC-Lokale Netzwerke	12
1.3.2 Powerline-Adapter.....	12
2. Arbeitsprinzipien von Powerline-Adapter	14
2.1 Kopplung.....	14
2.1.1 Kapazitive Koppler.....	15
2.1.2 Transformator-Kondensator-Koppler.....	18
2.1.3 Induktive Koppler.....	20
2.2 Digitale Übertragungstechniken.....	21
2.2.1 Einzelträgermodulation	21
2.2.2 Phasenumtastung (BPSK-QPSK-DPSK)	22
2.2.3 QAM (Quadratur-Amplituden-Modulation).....	23
2.2.4 Spread Spectrum.....	23
2.2.5 Mehrfachzugriffsverfahren.....	23
2.2.5.1 TDMA (Zeitmultiplexverfahren).....	24
2.2.5.2 FDMA (Frequenzmultiplexverfahren)	24
2.2.5.3 CDMA (Codemultiplexverfahren)	24
2.2.5.4 OFDM (Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren).....	24
3. Hauptprobleme in PLC-Systemen	25
3.1 Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Übertragungsmedium in PLC-Systemen	25
3.1.1 Rauschen im Übertragungsmedium.....	25
3.1.2 Dämpfung im Übertragungsmedium	25

3.1.3 Signalverzerrung.....	26
3.1.4 Impedanzanpassung.....	26
3.1.5 Dämpfung und Kanalmodellierung	27
3.2 Herausforderungen durch externe Faktoren in PLC-Systemen.....	31
3.2.1 Variabler Netzwerkverkehr	31
3.2.2 Störungen mit bestehenden Kommunikationssystemen.....	31
3.2.3 Rauschen von externen Quellen	32
Zusammenfassung.....	33
Literaturverzeichnis	34

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der ausgewiesenen Hilfsmittel angefertigt habe. Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach anderen gedruckten oder im Internet verfügbaren Werken entnommen sind, habe ich durch genaue Quellenangaben kenntlich gemacht. Der Durchführung einer elektronischen Plagiatsprüfung stimme ich hiermit zu. Die eingereichte elektronische Fassung der Arbeit entspricht der eingereichten schriftlichen Fassung exakt. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine Wahrheitswidrige Erklärung rechtliche Folgen haben kann.

Istanbul, 14.01.2025

Unterschrift



Sude Nazlı Öztürk



Alperen Öncül

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ein in Enels System verwendetes Smart Metering-Gerät, generisches Bild	11
Figure 2: Ein grundlegendes Powerline-Lokales Netzwerk, [18]	12
Abbildung 3: Blockschaltbild eines typischen PLC-Modems [4]	14
Abbildung 4: Übertragender Kopplungsschaltkreis mit einem einzelnen Kondensator [2]	15
Abbildung 5: Empfänger Kopplungsschaltkreises mit einem einzelnen Kondensator[2]	16
Abbildung 6: Hochpassfiltercharakteristik von übertragenden und empfangenden Einzelkondensatorkoppler Schaltungen	17
Abbildung 7: Hochfrequenz-Isolationstransformator-Kondensator-Kopplungsschaltung [2]	18
Abbildung 8: Impedanzanpassender Transformator-Kondensator-Kopplungsschaltkreis [2]	19
Abbildung 9: Bandpasscharakteristik des impedanzanpassenden Transformator-Kondensator- Kopplungsschaltkreises [2]	19
Figure 10: Übertragungsmethoden für Power Line Communication. [4]	21
Abbildung 11: Ersatzschaltbild eines infinitesimal kleinen Abschnitts der Stromleitung. R' steht für den Widerstand pro Länge, L' für die Induktivität pro Länge, C' für die Kapazität pro Länge und G' steht für den Leitwert pro Länge.[1]	27
Abbildung 12 Modell des Echokanals[1]	29
Abbildung 13: Verbindungskonfiguration für die Bestimmung der Pfade, die in Übereinstimmung mit einer überbrückten Anzapfung in A, gefolgt von einer Unterbrechung in C.[1]	30
Abbildung 14: Kanalcharakteristik des Einzweignetzes[1]	30
Abbildung 15: Kanalcharakteristik des Netzes mit sechs Zweigen[1]	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung einiger CENELEC-Frequenzbänder, die üblicherweise in schmalbandigen PLC-Systemen verwendet werden (Carcelle, 2009, p. 151)	9
Tabelle 2: Frequenzbänder von Breitband-PLC-Anwendungen (Carcelle, 2009, p. 156)	10
Tabelle 3: Verschiedene von HomePlug PA festgelegte Standards [18]	13

Abkürzungsverzeichnis

PLC	Power-line Communication
NB	Schmalband
BB	Breitband
NS	Niederspannung
MS	Mittelspannung
HS	Hochspannung
C/N	Träger-Rausch-Verhältnis
BER	Bitfehlerrate
EMI	Elektromagnetische Störung
MIMO	Mehrfache Eingabe Mehrfache Ausgabe
ISI	Intersymbolinterferenz

1. Einleitung

1.1 Grundlagen der PLC-Systemen

Power Line Communications (PLC)-Systeme ermöglichen die Datenübertragung über Stromleitungen, die zur Übertragung oder Verteilung von Wechselstrom (AC) elektrischer Energie verwendet werden. Die ersten Beispiele dieser Systeme wurden in elektrischen Energieverteilungssystemen eingesetzt, um die Sicherheit und Kommunikation zwischen Kraftwerken, Umspannwerken und Verteilungszentren zu gewährleisten. Solche Systeme konnten zunächst nur eine schmalbandige Datenübertragung (NB-PLC) sicherstellen, aber in den letzten Jahren gab es Fortschritte in PLC-Systemen, die hohe Datenübertragungsraten über Mittel- und Niederspannungsleitungen (BB-PLC) ermöglichen. Mit diesen Verbesserungen haben Konzepte wie intelligentes Messwesen (Smart Metering) und Heimnetzwerke (Home Area Networking) stark an Bedeutung gewonnen und es gab bemerkenswerte Implementierungen. Das Hauptproblem bei PLC-Systemen besteht darin, dass die Stromleitungen ursprünglich nicht zur Datenübertragung oder für Kommunikationszwecke konzipiert wurden. Daher stellen bestimmte Herausforderungen wie Rauschen, Dämpfung und Störungen durch andere Kommunikationssysteme ein raues Medium dar.[1]

In PLC-Systemen werden bestimmte Elemente, Übertragungs- und Modulationstechniken verwendet. Zu den Schlüsselementen können Filter, Modulatoren, Verstärker, Demodulatoren, Koppler und Mikrocontroller als Beispiele genannt werden. Wichtige Übertragungstechniken wie Spread-Spectrum und OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) haben definitiv erheblich zur Realisierung von Breitband-PLC-Systemen beigetragen.

1.2 Schmalbandige PLC und Breitbandige PLC

Je nach Betriebsfrequenzband und beabsichtigter Anwendung können PLC-Systeme grob in schmalbandige (NB-PLC) und breitbandige (BB-PLC) Technologien unterteilt werden.

1.2.1 Schmalbandige PLC

Schmalbandige PLC (NB-PLC) operiert hauptsächlich in niedrigen Frequenzbändern (ungefähr unter 500 kHz) mit Datenraten von bis zu mehreren hundert kbps. Das Design priorisiert Robustheit und Zuverlässigkeit, was es nützlich für Anwendungen macht, die keine hohe Durchsatzrate benötigen, aber eine zuverlässige und langreichweitige Konnektivität erfordern. Those typical applications include; Intelligente Messsysteme (AMI), Haus- und Gebäudeautomatisierung (Beleuchtungssteuerung, HLK, Sicherheitssysteme), Überwachung und Steuerung des Versorgungsnetzes (z.B. Lastmanagement, Fehlererkennung), Straßenbeleuchtungssteuerung und weitere Anwendungen im Bereich des Internet der Dinge mit niedriger Geschwindigkeit [14, 15, 1, 4].

Tabelle 1: Darstellung einiger CENELEC-Frequenzbänder, die üblicherweise in schmalbandigen PLC-Systemen verwendet werden (Carcelle, 2009, p. 151)

CENÉLEC BAND	FREQUENCY BAND	USE
	3 to 9 kHz	Limited to electrical network operators for their specific needs, like remote meter reading
A	9 to 95 kHz	Limited to electrical network operators
B	95 to 125 kHz	Home automation use (baby phones, and so forth)
C	125 to 140 kHz	Home automation use (X10, and so forth)
D	140 to 148 kHz	Home automation use

1.2.2 Breitbandige PLC

Im Gegensatz zur NB-PLC operiert BB-PLC in höheren Frequenzbändern, die von 1,8 bis 30 MHz reichen, und bietet dadurch deutlich höhere Datenraten (in einigen Implementierungen bis zu 2 Gbit/s). Das Design konzentriert sich auf hohe Durchsatzraten und effiziente Datenübertragung, was es besonders geeignet für Anwendungen macht, die höhere

Geschwindigkeiten über kurze Entfernungen erfordern, wie zum Beispiel Heimnetzwerke. Dank adaptiver Modulationstechniken wie OFDM kann BB-PLC in verschiedenen Umgebungen eine hohe Leistung aufrechterhalten, ist jedoch von Natur aus anfälliger für Rauschen und Störungen als seine schmalbandige Gegenstück [14, 15, 1, 4].

Tabelle 2: Frequenzbänder von Breitband-PLC-Anwendungen (Carcelle, 2009, p. 156)

PLC TECHNOLOGY	FREQUENCY BAND	OFDM CARRIER NUMBER
HomePlug 1.0	4.49 to 20.7 MHz	76
HomePlug 1.1	Same	Same
HomePlug AV	2-28 MHz	917
DS2	-1.6 to 30 MHz	-100
-45 Mbit/s	-2.46 to 11.725 MHz +	-1,280 + 1,280
-200 Mbit/s	13.8 to 22.8 MHz	
Spidcom	-2 to 30 MHz	-900
	-30 to 60 MHz (external)	-Same
Main.net	4.3 to 13 MHz	NC

1.3 Anwendungsfälle und Anwendungen

Die Power Line Communication (PLC)-Technologie nutzt die bestehende elektrische Infrastruktur, um eine Vielzahl von Datenübertragungsanwendungen zu ermöglichen, die sowohl Wohn- als auch Geschäftsbereiche erheblich verbessern. Unter den primären Anwendungen ragt das intelligente Messwesen (Smart Metering) als eine Anwendung der schmalbandigen PLC hervor. Intelligente Messgeräte sind fortschrittliche Versorgungszähler, die den Energieverbrauch in Echtzeit überwachen und aufzeichnen. Sie basieren auf PLC-Netzwerken, um Verbrauchsdaten von Haushalten oder Unternehmen an Versorgungsanbieter und umgekehrt über die bestehende elektrische Infrastruktur zu übertragen. [14]



Abbildung 1: Ein in Enels System verwendetes Smart Metering-Gerät, generisches Bild

Intelligentes Messwesen bietet mehrere bemerkenswerte Vorteile. Einer der Hauptvorteile ist die bidirektionale Kommunikation, die den Datenaustausch in beide Richtungen ermöglicht. Verbraucher erhalten Echtzeitinformationen über Energiepreise und Nutzungsmuster, während Versorgungsanbieter wertvolle Einblicke in Verbrauchstrends gewinnen, um Maßnahmen zur Nachfragesteuerung zu erleichtern. Eine verbesserte Netzverwaltung wird ebenfalls durch die Echtzeitüberwachung des Energieverbrauchs erreicht. Versorgungsunternehmen können schnell Probleme wie Stromausfälle oder Anomalien im Netz erkennen, was eine schnellere Fehlerbehebung und Wartung ermöglicht. Darüber hinaus wird das Lastmanagement effizienter, wodurch Versorgungsunternehmen Angebot und Nachfrage zeitnah und effektiv ausbalancieren können. Bemerkenswerte Anwendungen, die in Gebrauch sind, umfassen Enels Telegestore-System in Italien, das Mitte der 2000er Jahre in Betrieb genommen wurde, sowie die Linky Smart Meter von Enedis [14].



Abbildung 2: Vom Techniker installiertes Smart Linky-Messgerät, (Sow, 2022)

1.3.1 PLC-Lokale Netzwerke

PLC-Lokale Netzwerke erweitern die Möglichkeiten herkömmlicher kabelgebundener oder kabelloser Netzwerke, indem sie die bestehende elektrische Verkabelung für die Datenübertragung nutzen. Dieser Ansatz vereinfacht die Konnektivität und senkt die Kosten, wodurch eine Vielzahl von Anwendungsfällen in Haushalten und Büros ermöglicht wird, ohne dass zusätzliche Infrastruktur erforderlich ist. Durch die Nutzung vorhandener Steckdosen kann PLC verschiedene Anwendungen unterstützen, einschließlich Internetverbindungsfreigabe, Datei- und Druckerfreigabe, Audioübertragung und Videoüberwachung.

Die Internetverbindungsfreigabe ist eine der gängigsten Implementierungen von PLC. Mit einem zentralen Modem, das Signale über die Stromleitungen sendet, kann jede Steckdose als bequemer Zugangspunkt fungieren, wodurch die Installation neuer Netzkabel entfällt. Obwohl die gesamte Bandbreite mit zunehmender Anzahl der Benutzer abnehmen kann, wird dieser Kompromiss oft durch die einfache Einrichtung und die Flexibilität bei der Platzierung der Geräte ausgeglichen. PLC unterstützt auch die lokale Ressourcenfreigabe, indem Dateien und Drucker über die elektrische Verkabelung zugänglich gemacht werden. Dadurch wird die Zusammenarbeit vereinfacht und das Durcheinander durch separate Kabel reduziert [14].

1.3.2 Powerline-Adapter

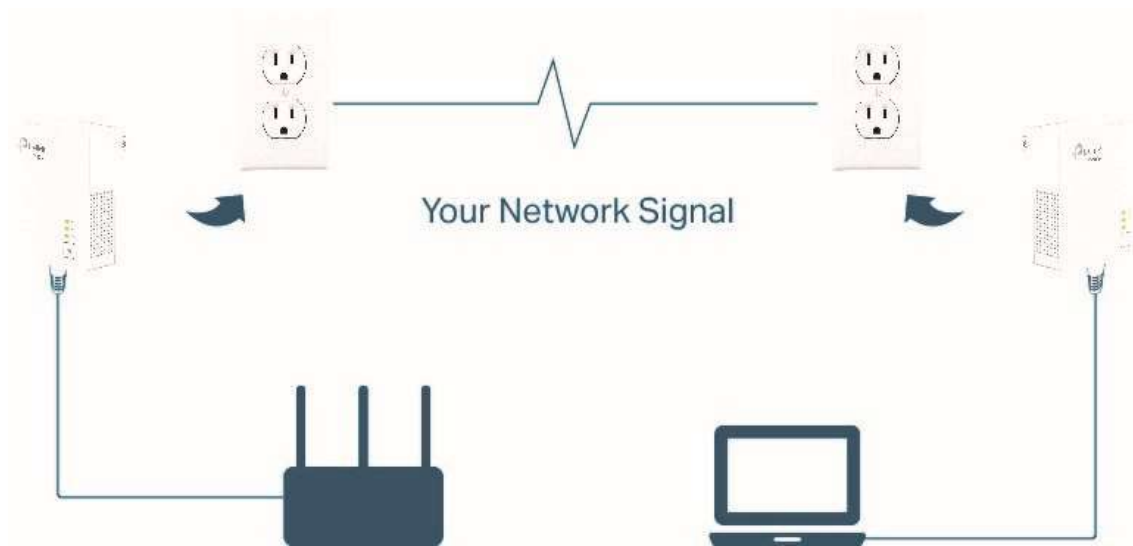


Figure 2: Ein grundlegendes Powerline-Lokales Netzwerk, [18]

Powerline-Adapter entsprechen den von der HomePlug Powerline Alliance festgelegten Standards, wobei HomePlug AV und HomePlug AV2 am weitesten verbreitet sind. HomePlug AV unterstützt physikalische Signalraten von bis zu 600 Mbit/s, was für Anwendungen wie HDTV und Heimkino ausreichend ist. [14, 1, 18, 19]

Tabelle 3: Verschiedene von HomePlug PA festgelegte Standards [18]

Standard	Signal rate	Application
HomePlug AV	Up to 600 Mbps	HDTV, home theatre
HomePlug AV2	Gigabit physical speed	4K Ultra HD video, multi-room IPTV, online gaming

Jedoch verlangen bandbreitenintensive Aufgaben wie Multi-Room 4K Ultra HD-Streaming und Online-Gaming oft eine höhere Durchsatzrate, was zur Einführung von HomePlug AV2 geführt hat. Dieser neuere Standard nutzt Technologien wie MIMO (Multiple Input, Multiple Output), um Gigabit-Geschwindigkeiten zu erreichen, was eine stabilere Abdeckung und höhere Datenraten gewährleistet. Durch die gleichzeitige Übertragung von Informationen neben dem bestehenden elektrischen Strom vereinfachen diese Adapter die Netzwerkerweiterung und senken die Installationskosten, wodurch PLC-Lokale Netzwerke eine attraktive Lösung für nahtlose Konnektivität in modernen Haushalten und Büros darstellen. [18, 19]

2. Arbeitsprinzipien von Powerline-Adapter

Das Hauptprinzip, damit unsere Daten zwischen Stromleitungen übertragen werden, besteht darin, Trägerwellen zu verwenden. Eine grundlegende Darstellung eines PLC-Modems wird unten gezeigt.

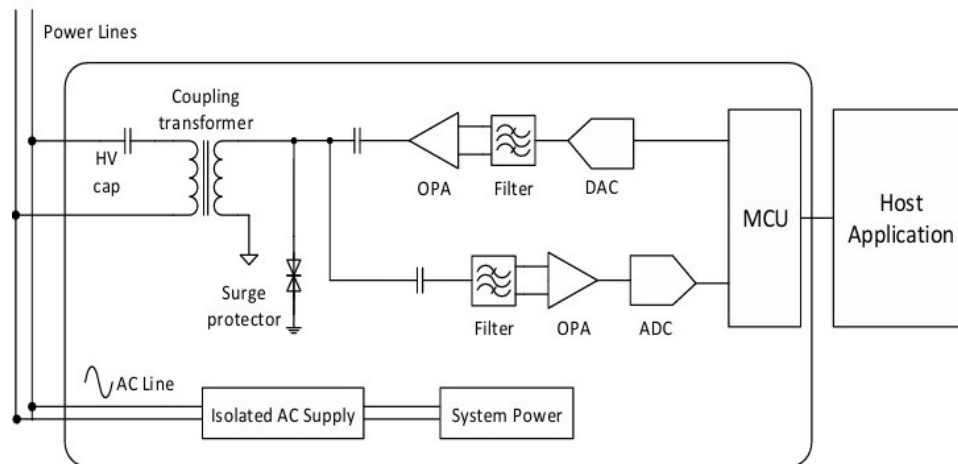


Abbildung 3: Blockschaltbild eines typischen PLC-Modems [4]

Das Modem koppelt die Wechselspannungswellenfrequenz (50-60 Hz) mit modulierten Hochfrequenz-Datensignalen, was der Prozess als Kopplung bezeichnet wird. Die Signale reisen durch dasselbe Medium und werden am gegenüberliegenden Ende vom Empfänger gefiltert. [1, 4]

2.1 Kopplung

Die Kopplung ist ein wichtiger Prozess in einem PLC-System, der die Überlagerung des modifizierten Signals auf die Stromwellenform (Senderkoppler) sicherstellt und dieses Signal aus der Stromwellenform (Empfängerkoppler) mit blockierter Netzspannung empfängt und extrahiert. Modems oder Messgeräte können nicht direkt an die Stromleitung angeschlossen werden, da diese Geräte dadurch negativ beeinflusst würden und ihre Funktion verlieren würden.[1,2]

Es gibt verschiedene Arten von Kopplern. Hauptsächlich können Koppler in zwei Gruppen unterteilt werden: induktive und kapazitive Koppler. Bei der Konstruktion des Kopplers

müssen verschiedene Faktoren und Hindernisse berücksichtigt werden, wie beispielsweise die sich ändernde Impedanz an Niederspannungsleitungen, verursacht durch wechselnde Lasten. Die meisten Koppler arbeiten jedoch nach dem Filterprinzip, bei dem bestimmte Frequenzbänder gedämpft werden. In diesem Prozess muss die Dämpfung des Kommunikationssignals minimiert werden, um eine effiziente Signalübertragung zu gewährleisten.[1,2]

2.1.1 Kapazitive Koppler

Kapazitive Koppler werden häufig in Niederspannungs-PLC-Systemen (NS- PLC) eingesetzt, da es viele Verzweigungen gibt und kapazitive Koppler kostengünstige Lösungen bieten. Außerdem werden kapazitive Koppler mit elektrischen Verbindungen zur Stromleitung bevorzugt, weil PLC-Modems eine Gleichstromversorgung (DC) benötigen, die als Energiequelle die Netzspannung der Stromleitung nutzen. Da eine elektrische Verbindung zwischen der Stromleitung und dem Modem besteht, können kapazitive Koppler auch mit wirtschaftlichen Vorteilen verwendet werden. Es gibt verschiedene Typen von kapazitiven Kopplern, aber das Arbeitsprinzip kapazitiver Koppler kann durch die Betrachtung des folgenden Kopplungsschaltkreises mit einem einzelnen Kondensator verstanden werden.[1,2]

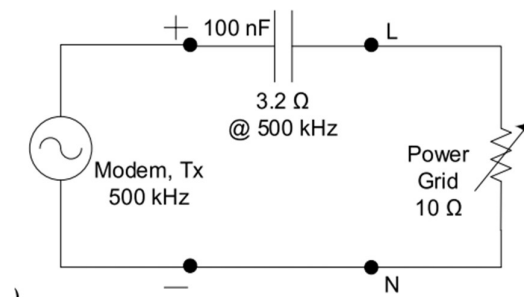


Abbildung 4: Übertragender Kopplungsschaltkreis mit einem einzelnen Kondensator [2]

Wenn dieser Schaltkreis untersucht wird, ist es zu erkennen, dass die Impedanz des Kondensators für das Kommunikationssignal mit einem Frequenzbereich von 500 kHz, 3,18 Ohm beträgt. Der Berechnungsprozess sieht wie folgt aus,

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C},$$

$$|Z_c| = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

$$|Z_c| = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 3,18 \text{ Ohms.}$$

Es ist erkennbar, dass der Widerstand gegen das Kommunikationssignal sehr niedrig ist, sodass die Übertragung des Signals in der Stromleitung ohne starke Dämpfung möglich ist.

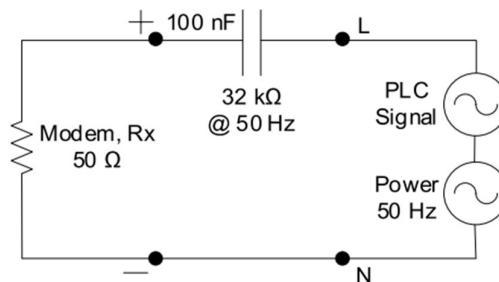


Abbildung 5: Empfänger Kopplungsschaltkreises mit einem einzelnen Kondensator[2]

Wenn die Impedanz des Stromleitungssignals im Frequenzbereich von 50 Hz berechnet wird, ist es zu erkennen, dass das Netzspannungssignal aufgrund des hohen Impedanzwerts des Kondensators stark gedämpft und blockiert wird. Der Berechnungsprozess sieht wie folgt aus,

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C},$$

$$|Z_c| = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

$$|Z_c| = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 31831 \text{ Ohms.}$$

Wie aus den Berechnungen erkennbar ist, zeigen die Koppler mit einem einzelnen Kondensator eine Hochpassfiltercharakteristik. Es ist wichtig, die -3 dB Grenzfrequenz zu untersuchen, bei der der maximale Leistungswert des Signals auf die Hälfte reduziert wird. Da die Frequenzen, die niedrigere Werte als die Grenzfrequenz aufweisen, stark gedämpft werden, sollte das Koppler-Design entsprechend der Frequenzbandbreite des Kommunikationssignals gestaltet werden. Die Grenzfrequenz eines Hochpassfilters (auch dieses Kopplers) könnte mit der folgenden Formel berechnet werden [2]

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \cdot$$

R: Abschlusswiderstand

C: Kapazität

Die Grenzfrequenzen für übertragende und empfangende Kopplerschaltungen sind unterschiedlich, da die Abschlusswiderstände für diese Schaltungen unterschiedlich sind.

$$f_{c-T} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 159155 \sim 160 \text{ kHz}$$

$$f_{c-R} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 31831 \sim 32 \text{ kHz}$$

Aus den Ergebnissen ist es erkennbar, dass die Grenzfrequenzen für übertragende und empfangende Schaltungen unterschiedlich sind. Diese Situation kann Leistungsprobleme verursachen und stellt einen ernsthaften Nachteil für Einzelkondensatorkoppler dar.[2]

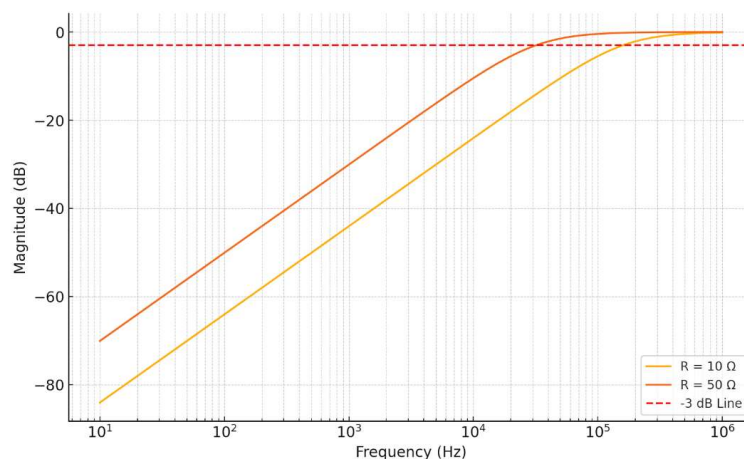


Abbildung 6: Hochpassfiltercharakteristik von übertragenden und empfangenden Einzelkondensatorkoppler Schaltungen

2.1.2 Transformator-Kondensator-Koppler

Transformator-Kondensator-Koppler werden häufig in Niederspannungs-PLC-Systemen (NS-PLC) eingesetzt, aufgrund der Vorteile, die sie bieten. Der Transformator gewährleistet eine galvanische Trennung, da die Energieübertragung über das magnetische Feld erfolgt und kein direkter elektrischer Kontakt zwischen dem Stromleitungsnetz und dem Modem besteht. Dies kann auch eine Lösung für Erdschlussprobleme sein, die durch die Rückwege entstehen, die durch den Kurzschluss zwischen N (Neutralleiter) und PE (Schutzleiter) geschaffen werden. [1,2]

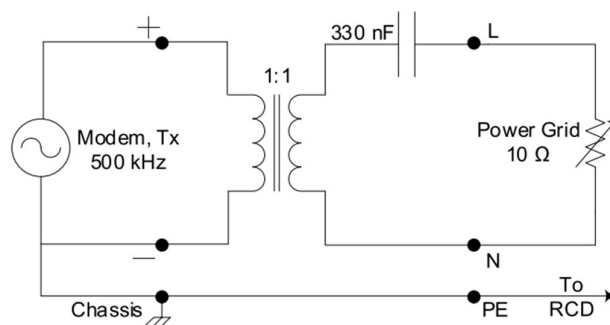


Abbildung 7: Hochfrequenz-Isolationstransformator-Kondensator-Kopplungsschaltung [2]

Der Transformator wird auf der Modemseite platziert, was die Verwendung eines kleinen Transformators ermöglicht. Außerdem können sie zur Impedanzanpassung zwischen der Stromleitung und dem Modem verwendet werden, indem das Windungsverhältnis des Transformators genutzt wird, da dies die von der Quelle, die an die Primärwicklung angeschlossen ist, gesehene Impedanz beeinflusst.[2]

$$Z_p = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \cdot Z_s$$

Z_p = Primärimpedanz

Z_s = Sekundärimpedanz

$\frac{N_p}{N_s}$ = Windungsverhältnis

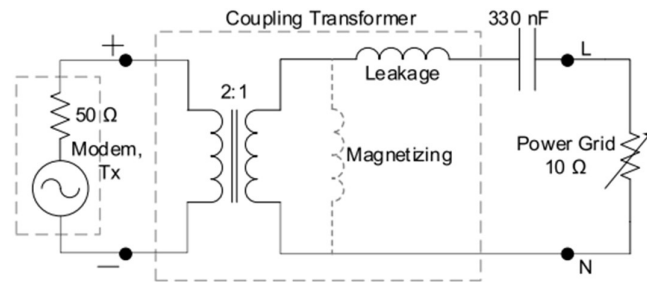


Abbildung 8: Impedanzanpassender Transformator-Kondensator-Kopplungsschaltkreis [2]

Für diesen impedanzanpassenden Transformatorkreis wird die Impedanz auf der Modemseite, als 12,5 Ohm wahrgenommen, was ein sehr naher Wert zu 10 Ohm ist. [2]

Impedanzanpassende Transformatoren haben eine Kombination aus Leckinduktivität und Kondensator, die dem Kopplungsschaltkreis eine Bandpasscharakteristik hinzufügt.[2]

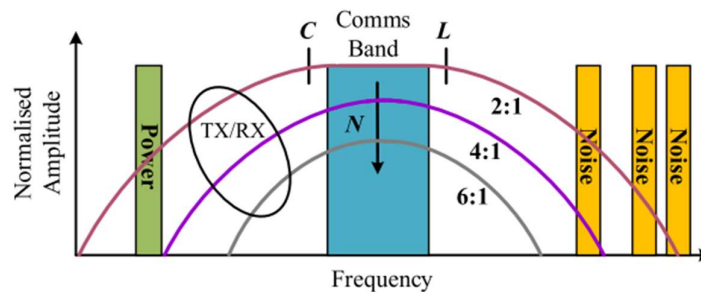


Abbildung 9: Bandpasscharakteristik des impedanzanpassenden Transformator-Kondensator-Kopplungsschaltkreises [2]

Bandpasscharakteristiken der Kopplungsschaltungen haben den Vorteil, dass sie Rauschen und unerwünschte Störquellen herausfiltern. Außerdem kann die Signalverschlechterung bis zu einem gewissen Grad verhindert werden, indem Signale innerhalb des gewünschten Frequenzbands übertragen werden. Die Grenzfrequenzen können mit den Formeln für die Grenzfrequenzen von Hoch- und Tiefpassfiltern berechnet werden, um die Bandbreite zu bestimmen.[2]

$$f_L = \frac{1}{2\pi R C}$$

$$f_U = \frac{1}{2\pi \frac{L}{R}}$$

Es ist zu erkennen, dass das Frequenzband mit steigendem Windungsverhältnis kleiner wird. Wenn dies jedoch nicht präzise berechnet wird, kann diese Situation zu einer Dämpfung des Kommunikationssignals führen.[2]

2.1.3 Induktive Koppler

Induktive Kopplungsschaltungen werden mit Transformatoren aufgebaut, und die Signalübertragung erfolgt nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion ohne direkten elektrischen Kontakt.

2.1.3.1 Induktiver Koppler mit Toroidkern

Diese induktiven Koppler verfügen über einen toroidalen Kern, meist Ferritkerne, die den magnetischen Fluss innerhalb des Kerns einfangen. Dies hilft, elektromagnetische Störungen und die dadurch verursachten Energieverluste zu verhindern. Diese Koppler bieten geringe Einfüge- und Rücklaufverluste und ermöglichen gleichzeitig eine breite Frequenzbandbreite.[2,3]

Da das Windungsverhältnis direkt die Spannungspegel der Primär- und Sekundärseite des Transformators beeinflusst, basiert das Arbeitsprinzip dieser Transformatoren auf der Strommessung. Das hohe Spannungsniveau im Stromnetz würde entsprechend dem Windungsverhältnis des Transformators verstärkt werden, was das Modem schädigen könnte.[2]

2.2 Digitale Übertragungstechniken

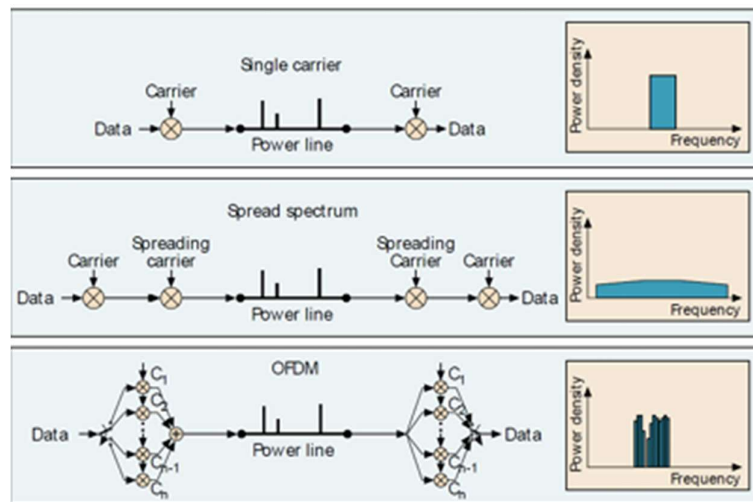


Figure 10: Übertragungsmethoden für Power Line Communication. [4]

2.2.1 Einzelträgermodulation

Modulation ist der Prozess des Hinzufügens von Informationen (Daten) auf die Hochfrequenz-Trägerwelle durch Veränderung der Merkmale, die Amplitude, Frequenz und Phase der Trägerwelle sind. Bei der Einzelträgermodulation wird nur eine dieser Eigenschaften verändert. Einzelträgermodulation Modulation basiert auf der Verwendung einer einzigen Trägerfrequenz (f) und wird meist für Übertragungen mit niedrigen Datenraten verwendet. Diese Modulationstechnik bietet niedrige Kosten und unkomplizierte Lösungen für die Datenübertragung.[4–6]

Die Amplitudenmodulation umfasst die Veränderung der Amplitude der Trägerwelle in Bezug auf die Information des Basisbandsignals. Die Frequenzmodulation hingegen ist die Veränderung der Frequenz der Trägerwelle und Phasenmodulation ist die Veränderung der Phase des Trägersignals. Der Bandbreitenbedarf und der Schaltungsaufwand für die Amplitudenmodulation sind im Vergleich zu den anderen Modulationsverfahren deutlich geringer. Es kann auch festgestellt werden, dass die Phasen- und Frequenzmodulationen bessere Ergebnisse bei der Störfestigkeit und die Qualität der empfangenen Daten liefern.[4–7]

2.2.2 Phasenumtastung (BPSK-QPSK-DPSK)

Die Phasenumtastung gehört zu den digitalen Modulationsverfahren und hat Vorteile bei zum Beispiel hohen Datenübertragungsraten, guter Signalqualität und Datensicherheit gegenüber analogen Modulationsverfahren. Bei dieser Übertragungstechnik wird die Phase des sinusförmigen Trägersignals entsprechend dem Kommunikationssignal variiert. [4,5]

2.2.2.1 BPSK (Binäre Phasenumtastung)

Diese Modulation ist auch als 2-Phasen-PSK- oder Phasenumkehr-Tastung bekannt und ist die einfachste Form von PSK. Die beiden Phasen symbolisieren eine logische 1 oder 0, so dass pro Zyklus nur ein Bit moduliert werden kann. pro Zyklus moduliert werden. Diese Modulationstechnik ist robust gegen Rauschen, bietet aber keine hohe Datenübertragungsraten.[4,5]

2.2.2.2 QPSK (Quadratur-Phasenumtastung)

Bei dieser Modulationstechnik nimmt die Sinuswelle des Trägersignals vier Phasenumkehrungen und ermöglicht so die Modulation von zwei Bits pro Zyklus. Die QPSK-Modulationstechnik könnte eine gute Lösung sein, da mit der gleichen Bandbreite wie in BPSK die doppelte Datenmenge übertragen werden kann. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass QPSK 3 dB mehr C/N (Träger-Rausch-Verhältnis) als BPSK benötigt, um die gleiche BER (Bitfehlerrate) zu erreichen. Eigentlich ist die theoretische BER, die nach SNR, (Signal-Rausch-Verhältnis) pro Bit berechnet wird, ist für QPSK und BPSK gleich, aber wenn man das SNR pro Träger betrachtet, kann man sehen, dass BPSK 3 dB weniger C/N braucht.[4,5]

2.2.2.3 DPSK (Differentielle Phasenumtastung)

Bei dieser Modulationstechnik werden im Sender zwei Operationen durchgeführt, nämlich differentielle Codierung und Phasenumtastung. Damit soll die Notwendigkeit der Kohärenz des gesendeten und des empfangenen Signals eliminiert werden. Bei dieser

Modulationstechnik ist Referenzoszillator nicht erforderlich, da der Demodulator nur die Phasenänderungen bestimmen muss.[4,8]

2.2.3 QAM (Quadratur-Amplituden-Modulation)

Diese Modulationstechnik variiert sowohl die Amplitude als auch die Phase der Trägerwelle. Die beiden Trägerwellen sind in Quadraturphase, was eigentlich bedeutet, dass sie um plus oder minus 90 Grad phasenverschoben sind, wie eine Sinus- und eine Cosinuswelle. Diese beiden modulierten Trägersignale können dann Demodulation durch Multiplikation mit Kosinus- und Sinuswellen, die die gleiche Frequenz wie die ursprünglichen Trägerwellen haben, mit den ursprünglichen Trägerwellen haben, was bedeutet, dass die Demodulation kohärent ist.[4,9]

2.2.4 Spread Spectrum

Die Spread-Spectrum-Modulation wird in PLC-Systemen verwendet, um elektromagnetische Störungen zu verringern. Bei dieser Modulationstechnik wird ein Signal, das mit einer bestimmten Bandbreite erzeugt wird, absichtlich in einem viel höheren Frequenzband übertragen. Das breite Band schafft Robustheit gegenüber den Schmalband-Störsignalen.[1,4,10]

2.2.5 Mehrfachzugriffsverfahren

Mehrfachzugriffsverfahren werden in Kommunikationssystemen verwendet, indem Senderressourcen in Abschnitte unterteilt werden, damit mehrere Benutzer denselben Kanal nutzen können. Diese Techniken schaffen eine Kommunikationsumgebung mit minimaler Interferenz und maximaler Zuverlässigkeit.[1]

2.2.5.1 TDMA (Zeitmultiplexverfahren)

Bei dieser Technik wird die Zeitachse in Schlitze unterteilt und jeder Benutzer wird diesen Schlitzen zugewiesen. Die Signale werden in den ihnen zugewiesenen Zeitschlitzen übertragen, belegen aber das gesamte Frequenzband. Die Schlitze werden mit Intervallen geschützt, falls Verzögerungen oder zeitliche Ungenauigkeiten auftreten.[1]

2.2.5.2 FDMA (Frequenzmultiplexverfahren)

Bei dieser Technik wird das Frequenzband in Abschnitte unterteilt und jeder Benutzer wird diesen Abschnitten zugewiesen. Um hohe Datenübertragungsraten zu erreichen, sollte die verfügbare Bandbreite proportional groß sein, da sie für die Benutzer in Portionen aufgeteilt wird. Um Überschneidungen zu verhindern, werden Schutzbänder zwischen den benachbarten Frequenzen verwendet.[1]

2.2.5.3 CDMA (Codemultiplexverfahren)

Bei dieser Technik teilen sich alle Nutzer die gleiche Frequenzbandbreite und Zeiteinteilung, aber die übertragenen Daten der Benutzer werden kodiert, um sie zu trennen.[1]

2.2.5.4 OFDM (Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren)

OFDM wird in vielen Systemen wie zum Beispiel PLC-Systemen verwendet, die mit bestimmten Problemen zu kämpfen haben, wie zum Beispiel Rauschen, Interferenzen und Dämpfungen. Bei dieser Technik werden die Daten über eine große Anzahl Unterträger übertragen, die schmalbandig sind und fast Flachschwund erleben. Diese Unterträger sind orthogonal zueinander und nutzen dasselbe Frequenzband ohne Überlappung. OFDM überwindet die ISI (Intersymbolinterferenz) durch die Verwendung von Unterträgern, was bedeutet, dass jedes übertragene Symbol eine größere Zeitspanne einnimmt und die Verzögerung Verbreitung bei diesen Symbolen weniger wirksam ist, um ISI zu erzeugen.[4,10,11]

3. Hauptprobleme in PLC-Systemen

3.1 Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Übertragungsmedium in PLC-Systemen

Power Line Communication (PLC)-Systeme stehen vor einer Vielzahl von Herausforderungen, die grob in solche im Zusammenhang mit dem Übertragungsmedium und solche, die durch externe Faktoren entstehen, unterteilt werden können. Die Bewältigung dieser Herausforderungen ist entscheidend für die Gewährleistung einer zuverlässigen und effizienten Datenübertragung über Stromleitungen.

3.1.1 Rauschen im Übertragungsmedium

Stromleitungen sind von Natur aus rauschende Umgebungen, die verschiedenen Arten von Störungen ausgesetzt sind, einschließlich farbigem Hintergrundrauschen, schmalbandigem Rauschen und impulsivem Rauschen. Farb- und schmalbandige Rauscharten sind relativ stationär und können oft mit gaußschen Rauschmodellen beschrieben werden. Impulsrauschen hingegen, typischerweise verursacht durch elektrische Geräte, Leistungsschwankungen oder elektromagnetische Störungen, sind unvorhersehbar und erfordern spezialisierte Modellierungsansätze wie Middleton Class A oder Alpha Stable-Verteilungen. Diese Rauscharten können Datensignale erheblich stören und die Zuverlässigkeit sowie die Leistung von PLC-Systemen beeinträchtigen. [14][15][1][4]

3.1.2 Dämpfung im Übertragungsmedium

Signaldämpfung stellt eine bedeutende Herausforderung in PLC-Systemen dar, da die Stärke der Datensignale mit der Entfernung entlang der Stromleitungen, insbesondere bei höheren Frequenzen, abnimmt. Diese Abschwächung des Signals über die Distanz erfordert den Einsatz von Repeatern oder Verstärkern, um die Signalintegrität aufrechtzuerhalten und eine konsistente Datenübertragung im gesamten Netzwerk zu gewährleisten. [1][15][1]

3.1.3 Signalverzerrung

Schwankungen in den elektrischen Lasten und wechselnde Bedingungen der Stromleitungen können zu Signalverzerrungen führen, die die Qualität der Datenübertragung beeinträchtigen. Fortschrittliche Signalverarbeitungstechniken sind erforderlich, um diese Verzerrungen zu kompensieren und die Integrität der übertragenen Daten aufrechtzuerhalten. [1]

3.1.4 Impedanzanpassung

Die Impedanzanpassung in Kommunikationssystemen ist von großer Bedeutung für eine effiziente Leistungsübertragung. Impedanzfehlanspassungen treten auf, wenn die Impedanz der Last am Ende der Stromleitung von der Impedanz der Leitung selbst abweicht. Die Impedanzanpassung verhindert Reflexionen und Leistungsverluste, die durch Reflexionen entstehen können. Es ist jedoch nicht einfach, eine Impedanzanpassung in PLC-Systemen sicherzustellen, da sich die Impedanz der Stromleitungen mit der Frequenz, der Zeit und den Lastbedingungen ändert. Im Vergleich zu MS- und HS-Leitungen haben NS-Leitungen kürzere Entfernungen und viele Verzweigungen, und außerdem gibt es viele industrielle Anwendungen und Anwendungen der Haushaltsgeräte an der Leitung.[1,12]

Der Reflexionskoeffizient kann wie folgt definiert werden,

$$r = \frac{Z_l - Z_L}{Z_l + Z_L}$$

wobei Z_l die Lastimpedanz und Z_L die Leitungsimpedanz ist. Es ist das Verhältnis der reflektierten Anteils des Signals zum vorwärts gesendeten Signal. Z_L kann als,

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \text{ ausgedrückt werden. [1]}$$

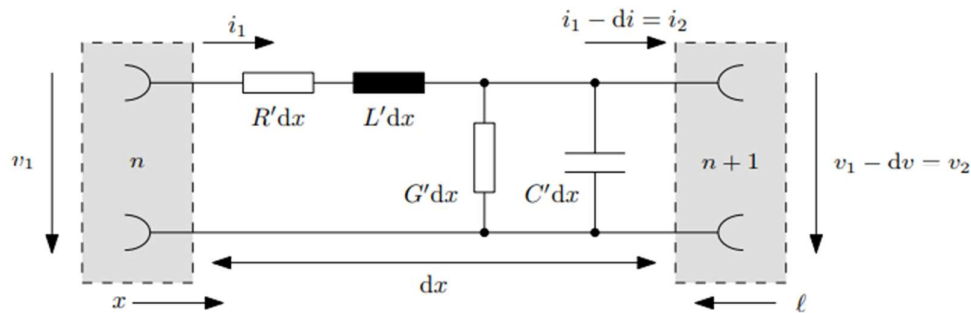


Abbildung 11: Ersatzschaltbild eines infinitesimal kleinen Abschnitts der Stromleitung. R' steht für den Widerstand pro Länge, L' für die Induktivität pro Länge, C' für die Kapazität pro Länge und G' steht für den Leitwert pro Länge.[1]

3.1.5 Dämpfung und Kanalmodellierung

Die Verluste der über die Stromleitung übertragenen Signale werden durch den Skin-Effekt und dielektrische Verluste verursacht. Der Skin-Effekt beschreibt die Zunahme der Stromdichte in Oberflächennähe mit zunehmender Frequenz, verursacht durch die Selbstinduktivität des Leiters. Der durch den Skin-Effekt verursachte Verlust Skin-Effekt verursachte Verlust kann durch den Verlustwinkel erklärt werden,

$$\tan \delta_L = \frac{R'}{\omega L'} . \quad [1]$$

Die Eindringtiefe ist ein wichtiger Faktor für die Bestimmung des Skin-Effekts. Sie kann geschrieben werden als,[1,13]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} .$$

ρ = der spezifische Widerstand

μ = die Permeabilität des Leiters

Durch die Erhöhung der Frequenz dieses Effekts steigt der Widerstand des Kabels. Der Widerstand wird unter Berücksichtigung der Tatsache berechnet, dass der Strom innerhalb der Eindringtiefe des Kabels fließt. Die Querschnittsfläche des Stromflusses der Massivkabel kann

mit dieser Formel bestimmt werden, bei Litzenleitern ist diese Fläche jedoch kleiner. Der Widerstand muss mit einem Korrekturfaktor X_R berechnet werden. X_R ist gegeben bei,[1,13]

$$X_R = [\cos^{-1}(\frac{r_{wire}-\delta}{r_{wire}})xr_{wire} - (r_{wire} - \delta) \cdot \sqrt{r_{wire}^2 - (r_{wire} - \delta)^2}]/(2xr_{wire}x\delta)$$

r_{wire} = Radius eines einzelnen Drahtes

[13]

Der mit dem Korrekturverhältnis berechnete Widerstand kann wie folgt angegeben werden,[13]

$$R_{cor} = X_R \cdot R \text{ and,}$$

$$R = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi f \mu_c}{\sigma_c}} (\Omega/m)$$

μ_c = Durchlässigkeit des leitenden Materials

σ_c = Leitfähigkeit des leitenden Materials

[13]

Dielektrische Verluste treten auf, wenn die Energie in Form von Wärme in die dielektrischen Materialien abgeleitet wird. Diese Verluste können durch den Verlustwinkel beschrieben werden,

$$\tan \delta_c = \frac{G'}{\omega \cdot C'} \cdot$$

[1]

Die dielektrischen Verluste und die durch den Skineffekt verursachten Verluste werden zur Bestimmung der Dämpfungscharakteristik $a(f)$ verwendet. Die Dämpfungscharakteristik des Stromleitungskanals hat einen wichtigen Einfluss auf die Bestimmung der Übertragungsfunktion des Kanals. Das $a(f)$ kann wie folgt ausgedrückt werden,

$$a(f) = \frac{1}{2} (\sqrt{\frac{\rho \mu f}{\pi r^2 Z_L^2}} + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C' \cdot Z_L \cdot \tan \delta_c).$$

[1]

Da die Dämpfungscharakteristik mit zunehmender Frequenz größer wird, kann das Tiefpass Verhalten von Powerline-Kanälen beobachtet werden.

Die Mehrwegeigenschaften des Stromnetzkanals, die durch Impedanzfehlanspassungen und Reflexionen verursacht werden, führen zu Echos. Ein Echo basiertes Kanalmodell wird häufig in SPS-Systemen verwendet, um das Verhalten des Kanals zu charakterisieren und die Übertragungsfunktion zu bestimmen. [1,13]

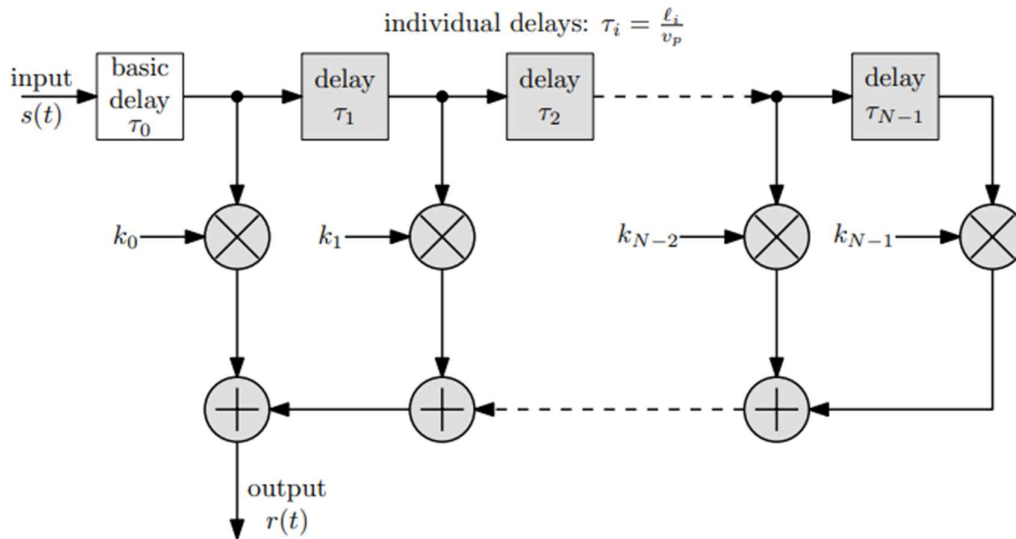


Abbildung 12 Modell des Echokanals[1]

In diesem Modell wird zeigt τ_i die individuelle Verzögerung und zeigt k_i die individuelle Dämpfung der einzelnen Echo. Unter Berücksichtigung von Verzögerungen und Dämpfungen kann die Übertragungsfunktion des echo basierten Modells wie folgt angegeben werden,[1]

$$H(f) = \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-\alpha(f) \ell_i} e^{-j2\pi f \ell_i / v_p} \quad [1]$$

g_i = eine komplexe Zahl, die von der Topologie der Verbindung abhängt

$\alpha(f)$ = Abschwächungscharakteristik

τ_i = mit dem i-ten Pfad verbundene Verzögerung

ℓ_i = Pfadlänge

N = Anzahl der Echos.

Unterbrechungen, die durch schlecht angeschlossene Drähte, korrodierte Stecker, Abzweigungen oder bestimmte Komponenten, die an die Stromleitung angeschlossen sind, wie Leistungsschalter, Relais usw., stören die reibungslose Ausbreitung der elektrischen Signale. Unterbrechungen und Impedanz Fehlanpassungen führen zu reflektierten und übertragenen Signalen. Ein Teil des Signals prallt zwischen den Diskontinuitäten und wird schließlich so weit abgeschwächt, dass es vernachlässigbar ist..[1]

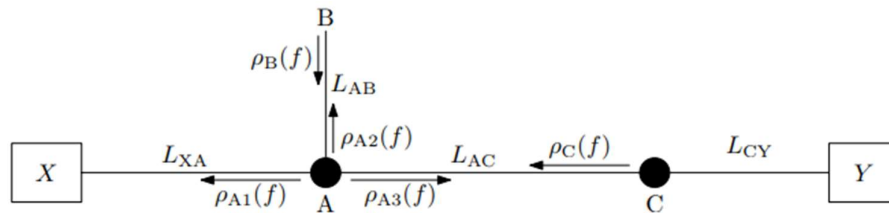


Abbildung 13: Verbindungskonfiguration für die Bestimmung der Pfade, die in Übereinstimmung mit einer überbrückten Anzapfung in A, gefolgt von einer Unterbrechung in C.[1]

Signale, die von X nach Y übertragen werden, können direkten Pfaden folgen, die X-A-Y sind (wenn die Diskontinuität C nicht vorhanden ist) und X-A-C-Y, oder die Signale können zwischen den Teilen hin- und herspringen und so eine unendliche Anzahl von möglichen Pfaden. Vergleicht man den Fall, in dem die Diskontinuität C nicht vorhanden ist, mit dem Fall, wo C vorhanden ist, wird gezeigt, dass das Hinzufügen von nur einer Diskontinuität zu einer drastischen Zunahme der Pfade führt.[1]

Bei der Untersuchung des Kanalverhaltens von Netzen mit Dämpfung und unterschiedlichen Zweigzahlen werden die Tiefpasscharakteristik des Kanals und die Kerben beobachtet.

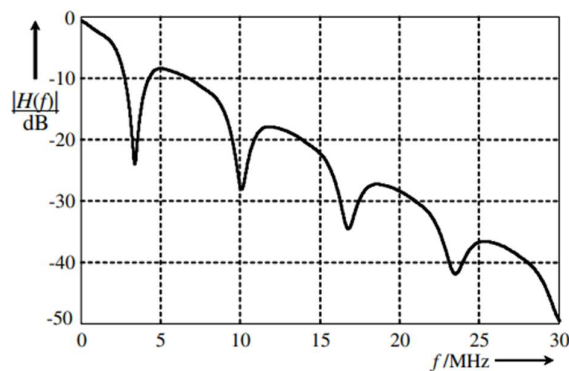


Abbildung 14: Kanalcharakteristik des Einzweignetzes[1]

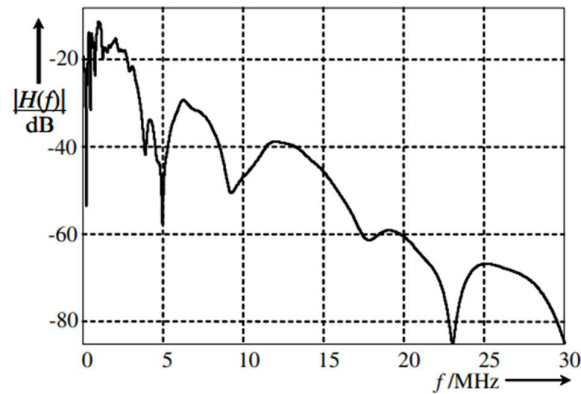


Abbildung 15: Kanalcharakteristik des Netzes mit sechs Zweigen[1]

Die Erhöhung der Zweigzahlen macht die Topologie des Netzes komplexer und durch die Zunahme der Pfadzahlen und Reflexionen werden die Kerben unregelmäßig und die Dämpfung wird höher sein.[1]

3.2 Herausforderungen durch externe Faktoren in PLC-Systemen

3.2.1 Variabler Netzwerkverkehr

Mit der zunehmenden Anzahl von Geräten, die an ein PLC-Netzwerk angeschlossen werden, kann der Netzwerkverkehr erheblich variieren, was zu Staus und reduzierter Datenübertragungsgeschwindigkeit führt. Effiziente Bandbreitenmanagementtechniken wie MU-MIMO sind erforderlich, um die steigenden Datenanforderungen im Netzwerk zu bewältigen. [15][1][4]

3.2.2 Störungen mit bestehenden Kommunikationssystemen

PLC-Systeme arbeiten häufig in Frequenzbändern, die mit anderen drahtlosen oder drahtgebundenen Kommunikationssystemen überlappen können, was zu gegenseitigen Störungen führt. Diese Störungen können den Datenfluss beeinträchtigen, und zur Minderung des Problems muss das System fortschrittliche Filtertechniken und adaptive Frequenzauswahl implementieren.

3.2.3 Rauschen von externen Quellen

Neben dem in den elektrischen Netzwerken erzeugten Rauschen sind PLC-Systeme auch anfällig für Störungen von externen Quellen wie Funkwellen und elektromagnetischen Emissionen aufgrund mangelnden EMI/RF-Schutzes in bestehenden Kabeln. Schmalbandiges Rauschen, das oft durch Funkwellen verursacht wird, kann besonders unterträgerbasierte Modulationsschemata wie OFDM, die hauptsächlich verwendet werden, stören. Die Bewältigung dieser Probleme erfordert ausgeklügelte Lösungen wie dynamisches Frequenz-Hopping und komplexe Fehlerkorrekturmechanismen. [20]

Zusammenfassung

Power Line Communication (PLC)-Systeme nutzen die vorhandenen Stromleitungen zur Datenübertragung und bieten eine kosteneffiziente Alternative für zum Beispiel die Umgebungen ohne passende Infrastruktur für Kommunikationszwecke. Es gibt schmalbandige und breitbandige PLC-Systeme. NB-PLC operiert in niedrigen Frequenzbändern mit Datenraten bis zu mehreren hundert kbps. BB-PLC hingegen arbeitet in höheren Frequenzbändern von 1,8 bis 30 MHz und unterstützt Datenraten bis zu 2 Gbit/s, was sie besonders geeignet für Anwendungen mit hohen Durchsatz Anforderungen über kurze Entfernungen macht, beispielsweise Heimnetzwerke und hochauflösendes Streaming.

Die Hauptkomponenten von PLC-Systemen sind Filter, Modulatoren, Verstärker, Demodulatoren, Koppler und Mikrocontroller. Transformator-Kondensator-Koppler sind häufig in PLC Systemen angewendet, da sie galvanische Trennung ermöglichen und auch für Impedanzanpassung verwendet werden können. Induktive Koppler wie mit Toroidkernen haben Vorteile für die Verhinderung von elektromagnetische Störungen .

Es gibt wichtige Herausforderungen, denen PLC Systeme gegenüber stehen, da die Leitungen, die für die Leitung elektrischen Stroms genutzt werden, für die Kommunikation nicht geeignet sind. Durch die Fehlanpassung der Impedanzen entstehen Reflexionen, was die Leistungsfähigkeit der Signalübertragung verschlechtert. Das Kommunikationssignal wird auch durch die Verluste verursacht bei Skin-Effekt und dielektrischen Verluste gedämpft. Ein wichtiger Faktor ist die Vielzahl von Zweigen, die sich in Niederspannungsnetzen befinden. Durch diese Merkmale, die die Signalübertragung beeinflussen, wird der Übertragungskanal mit einer mathematischen Formelsammlung beschrieben. Durch externe Faktoren wie variabler Netzwerkverkehr, Interferenzen mit anderen Kommunikationssystemen und externes Rauschen werden die Dämpfungseffekte stärker. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sind fortschrittliche Techniken wie MU-MIMO für das Bandbreitenmanagement, adaptive Filterung und dynamisches Frequenz-Hopping erforderlich.

Literaturverzeichnis

- [1] Ferreira HC. Power line communications : theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines. Wiley; 2010.
- [2] Janse Van Rensburg PA, Alahakoon S, Aghaei J, Watkins BP, Sibanda MP, Bui LA, et al. A Tutorial on Modem Coupling Circuits for Low-Voltage Power-Line Communications: Operating Principles, Trade-Offs, Design and Safety. IEEE Access 2024;1–20. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3479148>.
- [3] Costa LG da S, de Queiroz ACM, Adebisi B, da Costa VLR, Ribeiro MV. Coupling for Power Line Communications: A Survey. Journal of Communication and Information Systems 2017;32:8–22. <https://doi.org/10.14209/jcis.2017.2>.
- [4] Bucci G, Dolce S, Fiorucci E, Ciancetta F. Measurement in Research and Industry. n.d.
- [5] Digital Modulation Techniques n.d.:1–25.
- [6] Difference between Amplitude Modulation and Frequency Modulation. n.d.
- [7] Wilson SKate, Wilson SG., Biglieri Ezio. Transmission techniques for digital communications. Elsevier : Academic Press; 2016.
- [8] DIFFERENTIAL PHASE SHIFT KEYING (DPSK). n.d.
- [9] Quadrature amplitude modulation (QAM/DQAM). Instructor guide. Festo Didactic Ltée/Ltd; 2016.
- [10] Ustun Ercan S, Pena-Quintal A, Thomas D. The Effect of Spread Spectrum Modulation on Power Line Communications. Energies (Basel) 2023;16. <https://doi.org/10.3390/en16135197>.
- [11] Stantcheva M, Begain K, Hrasnica H, Lehnert R. Suitable MAC Protocols for an OFDM Based PLC Network. n.d.
- [12] IEEE Staff . 2008 11th IEEE International Conference on Communication Technology. I E E E; 2008.
- [13] Meng H, Chen S, Guan YL, Law CL, So PL, Gunawan E, et al. A Transmission Line Model for High-Frequency Power Line Communication Channel. n.d.
- [14] I. Carcelle, X. (2009). Power Line Communications in Practice. Artech House.
- [15] Sutterlin, P., & Downey, W.S. (1999). A Power Line Communication Tutorial- Challenges and Technologies.
- [16] A. Maneerung, S. Sittichivapak and K. Hongesombut, "Application of power line communication with OFDM to smart grid system," 2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), Shanghai, China, 2011, pp. 2239-2244, doi: 10.1109/FSKD.2011.6020014.

- [17] Peck, M., Alvarez, G., Coleman, B., Moradi, H., Forest, M., & Aalo, V. (2017). Modeling and Analysis of Power Line Communications for Application in Smart Grid.
- [18] Tp-Link. (2020, May 9). What is Powerline? | Powerline Adapter | TP-Link Türkiye. Link. <https://www.tp-link.com/tr/powerline/>
- [19] Powerline-Adapter: What is a Powerline Adapter? | How Does a Powerline Adapter Work? (2023, May 28). <https://www.lenovo.com/us/en/glossary/powerline-adapter/?orgRef=https%253A%252F%252F>
- [20] S. Bolognani, L. Peretti, L. Sgarbossa and M. Zigliotto, "Improvements in Power Line Communication Reliability for Electric Drives by Random PWM Techniques," IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, France, 2006, pp. 2307-2312, doi: 10.1109/IECON.2006.347388.