

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

1.1.1 Einführung in synchrone digitale Netze

Digitale Kommunikationsnetze werden bereits seit den sechziger Jahren in der Telekommunikation eingesetzt. Aus dieser Zeit stammen auch Spezifikationen der E-1 (Europa) und T-1 (USA und Japan) Zeitmultiplex-Rahmenstruktur [itu98a], die noch heute Grundlage digitaler Übertragungshierarchien sind. Da bereits geringe Abweichungen des Arbeitstakts kommunizierender Netzknoten nicht beliebig lange ausgeglichen werden können, traten mangels Synchronisation des Netzes systematische Übertragungsfehler auf. Bei der übertragenen Information handelte es sich hauptsächlich um analoge Daten wie zum Beispiel Sprache, so daß periodisch auftretende Fehler mit hinreichend kurzer Dauer bei nicht synchronisierten Endteilnehmern keine Rolle spielten.

Aufgrund der Natur der übertragenen Daten war noch während der siebziger Jahre bei der Einführung der *plesiochronen*¹ *digitalen Hierarchie (PDH)* eine Synchronisation der Endteilnehmer nicht notwendig. Die lokalen Taktabweichungen der höheren Ebenen und die sich daraus ergebenden unterschiedlichen Datenraten der Kommunikationspartner wurden dabei durch das Einfügen oder Verwerfen redundanter Füllinformation ausgeglichen.

Mit der fortschreitenden Digitalisierung verschiedenster Arten von Information und der daraus resultierenden Multimedialisierung der zu übertragenden Daten erwies sich in den achtziger Jahren das plesiochrone System als unzulänglich. Internationale Inkompatibilitäten, fehlende Übertragungsmöglichkeiten für Steuerinformation und extrem aufwendiger Zugriff auf Kanäle unterer Hierarchieebenen - nur möglich durch Demultiplexen sämtlicher Zwischenstufen - waren die sich ergebenden Hauptprobleme. Diesen trugen die 1988 als ITU-T Empfehlung G.707 [itu98b] spezifizierten Multiplexstrukturen der *synchronen digitalen Hierarchie (SDH)* Rechnung.

Definitionsgemäß die hervorstechendste Eigenschaft des synchronen Multiplexens im Vergleich mit plesiochronen Systemen ist die Synchronität aller Endteilnehmer. Diese ermöglicht zum einen den direkten Übergang zwischen beliebigen Multiplexebenen, zum anderen die Übertragung transparenter Datenströme, da das Verwerfen von Information keine Systemeigenschaft mehr ist.

Diese Vorteile der SDH Systeme bringen allerdings auch zusätzliche Aufgaben und neue Probleme mit sich. Damit alle Endteilnehmer synchron zueinander sind, muß jeder Netzknoten auf einen globalen Takt synchronisiert sein. Weichen die Takte zweier Kommunikationspartner voneinander ab, kommt es zu Störungen der zu übertragenden Daten. Das Beispiel im folgenden Abschnitt zeigt, wie so eine zunächst nicht vermutete Anfälligkeit synchroner Systeme entsteht.

¹fast-synchron

1.1.2 Darstellung typischer Probleme synchroner Netze

Wie dem vorherigen Abschnitt zu entnehmen ist, erfordern synchrone digitale Kommunikationsnetze die Synchronisation aller Netzknoten auf einen globalen Takt. Eine in der Telekommunikation weitverbreitete Methode ist dabei die sogenannte *Master-Slave* Strategie. Bei dieser existiert im Netz genau ein ausgezeichnete Knoten, der den Referenztakt des gesamten Netzes unabhängig von anderen Knoten vorgibt. Alle anderen Knoten müssen sich auf diesen Takt synchronisieren. Dazu wählen sie genau einen bereits *unabhängig von ihnen synchronisierten* Nachbarknoten aus, auf den sie sich selbst synchronisieren. Es kommt also eine zentralistische Struktur zum Einsatz. Die Unabhängigkeit der direkten Taktreferenz ist notwendig, da sich ansonsten mehrere nicht notwendigerweise zueinander synchrone Netzbereiche ausbilden können, in denen die Frequenzstabilität durch Schwingungsvorgänge stark beeinträchtigt ist.

Graphentheoretisch ausgedrückt muß der Takt also über einen *gerichteten, zusammenhängenden und zyklensfreien* Graphen verteilt werden, bei dem der Referenzknoten nur ausgehende und alle anderen Knoten genau eine eingehende Kante besitzen. Mit anderen Worten: Der Takt wird über einen gerichteten Spannbaum mit dem Referenzknoten als Wurzel verteilt. Dann existiert genau ein gerichteter Weg vom Wurzelknoten zu jedem Knoten des Netzes.

Wie sich eine Störung der Taktverteilung auswirken kann, wird am folgenden einfachen Beispiel deutlich. Abbildung 1.1 zeigt ein synchrones Netz mit Taktbaum und vier Datenkanälen p_1 , p_2 , p_3 und p_4 . Der Ausfall der Verbindung, über die p_1 läuft, bewirkt erwartungsgemäß eine unmittelbare Störung eben dieses Datenkanals. Der Kanal p_2 wird nicht beeinträchtigt, ebensowenig p_4 . Entgegen der Erwartung führt der Ausfall aber mit einer kurzen Verzögerung auch zu regelmäßigen Datenfehlern auf dem von der Störungsstelle weit entfernten Kanal p_3 .

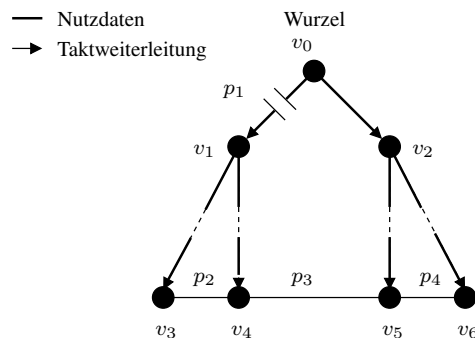


Abbildung 1.1: Störung von Prozeßdatenkanälen durch Ausfall der Taktverteilung

Die Notwendigkeit der Synchronität aller kommunizierender Knoten führt also dazu, daß eine Störung der Taktverteilung nicht nur die unmittelbar betroffenen Datenkanäle beeinträchtigt, sondern auch solche, die über funktionierende und eventuell weit von der Störung entfernte Übertragungseinrichtungen verlaufen. Da letztere prinzipiell Daten ungestört übertragen können, werden Mechanismen benötigt, um die Synchronität in den nur mittelbar beeinträchtigten Teilnetzen zu gewährleisten. Ebenso wie die Transportfunktion muß auch die Synchronisationsfunktion des Netzes geschützt werden, damit alle bei einer Störung noch verfügbaren Datenkanäle auch zuverlässig arbeiten.

Die Motivation, die geschilderte Problematik zu analysieren und entsprechende Lösungsverfahren zu erarbeiten, entstand während der Entwicklung des ISPN (Integrated Services Processdata Network) Systems am Lehrstuhl für Elektrotechnik der Universität Mannheim. Dieses System verwendet

Zeitmultiplex-Rahmen gemäß E1/PCM30 Spezifikation zur Kommunikation zwischen den Stationen. Die Datenkanäle werden den einzelnen PCM-Kanälen zugeordnet. Das ISPN ist also ein synchrones digitales System, in dem die Netzknoten wie oben beschrieben synchronisiert werden müssen. Das Auftreten der beschriebenen Probleme machte während der Entwicklungsphase eine genaue Problemanalyse und die Entwicklung eines automatischen Schutzverfahrens notwendig.

1.2 Ausgangspunkt und Ziele

Am Beispiel des ISPN wurde beobachtet, daß Störungen des Telekommunikationsnetzes zunächst unerwartet Übertragungsfehler auf weit von der Störstelle entfernten Nutzdatenkanälen hervorrufen können. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die möglichen Arten von Fehlern genau zu bestimmen, ihre Ursachen zu untersuchen und implementierbare Verfahren zur Vermeidung oder Minimierung der Auswirkungen der Störungen zu finden.

In dieser Arbeit werden stark vermaschte, gewachsene Netzstrukturen mit heterogenen Leitungsqualitäten angenommen, in denen die Schutzverfahren einsetzbar sein sollen. Diese Art von Netzen, wie sie beispielsweise bei Energieversorgungsunternehmen großflächig vorkommen, stellen auch das Einsatzgebiet des ISPN dar. Sie stellen darüberhinaus maximale Anforderungen an die Flexibilität und Robustheit des Lösungsverfahrens, so daß entsprechende Lösungsverfahren auch in einfacher strukturierten Netzen einsetzbar sind. Im Hinblick auf eine zuverlässige Datenübertragung steht dabei die Synchronität aller Netzknoten im Vordergrund. Im Vergleich zu den Netzen großer Telekommunikationsunternehmen ist die Frequenzstabilität des Taktsignals dagegen sekundär. Ebenso ist der Bandbreitenbedarf der einzelnen Dienste vergleichsweise gering.

Es werden die allgemeinen topologischen Zusammenhänge zwischen Störungen von Netzressourcen und der resultierenden Beeinträchtigung der Transportfunktion des Netzes untersucht. Dies beinhaltet sowohl eine Bestimmung der topologischen Wirkungsweise der Störungen als auch eine Untersuchung der Systemeigenschaften, welche zum Auftreten der Übertragungsfehler führen. Es zeigt sich dabei, daß diese Fehler letztlich durch eine Störung der Synchronisation der kommunizierenden Netzknoten verursacht werden. Die Aufgabe eines entsprechenden Lösungsverfahrens ist also die des Schutzes der Synchronisation durch die permanente Gewährleistung einer gültigen Taktverteilung.

Weiterhin werden objektive Bewertungsmaßstäbe definiert, welche einen Vergleich verschiedener Lösungsverfahren und den von ihnen gefundenen Lösungen ermöglichen. Es werden zu erfüllende Mindestanforderungen an Verfahren und Lösungen festgelegt. Wesentliche Kriterien sind hier die Ausfallsicherheit einer Taktverteilung oder die durch sie erreichte Frequenzstabilität des Taktes.

Darauf aufbauend erfolgt eine Untersuchung existierender Lösungsverfahren für das konkret vorliegende, aber auch für verwandte Probleme. Speziell für die Aufgabe des Synchronisationsschutzes existieren von ITU (International Telecommunication Union) und ETSI (European Telecommunications Standards Institute) eine Reihe von Spezifikationen zur Implementierung entsprechender Schutzverfahren. Es zeigt sich darüberhinaus, daß die Wegelenkung paketvermittelter Daten, wie sie beispielsweise im Internet oder in lokalen Computernetzen erfolgt, große Ähnlichkeit mit der hier gefundenen Aufgabenstellung aufweist.

Trotz der Ähnlichkeiten zeigt sich, daß die existierenden Verfahren verschiedene Nachteile besitzen. Dies ergibt sich aus den unterschiedlichen Einsatzgebieten und Randbedingungen, unter denen diese Verfahren operieren, und betrifft auch die dedizierten Synchronisationsschutzverfahren.

Um die hohen Anforderungen stark vermaschter Netze erfüllen zu können, wurde daher ein Synchronisationsschutzverfahren entwickelt, das auch in komplexen Netztopologien alle an ein Schutzverfahren gestellten Anforderungen erfüllen kann. Wie auch bei den untersuchten existierenden Schutzverfahren wird hierbei eine dezentrale Lösung zur Erhöhung der Robustheit eingesetzt.

1.3 Überblick

Kapitel 2 beinhaltet eine allgemeine Einführung in die Eigenschaften digitaler Übertragungssysteme. Eine Unterklasse davon stellen Systeme auf Basis eines hierarchischen Rahmenmultiplex dar. Die bezüglich der Synchronisation wichtigen Eigenschaften dieser Systeme werden in Kapitel 3 beschrieben. Kapitel 4 beschreibt ein konkretes synchrones digitales Rahmenmultiplex-System am Beispiel des ISPN, welches die Motivation und Randbedingungen für die im folgenden durchgeführten Untersuchungen liefert.

Als Grundlage aller im weiteren durchgeführten Untersuchungen wird in Kapitel 5 zunächst ein Modell des Systems definiert. Innerhalb dieses Modells erfolgt eine genaue Beschreibung und Analyse der einleitend dargestellten Fehler.

Um die zur Problemlösung vorgeschlagenen Verfahren objektiv miteinander vergleichen zu können, wird in Kapitel 6 ein präziser Algorithmusbegriff eingeführt. Auf diesem basiert die Definition der charakteristischen Eigenschaften eines jeden Schutzverfahrens.

Zur Bewertung der von den Schutzverfahren bestimmten Lösungen werden in Kapitel 7 sogenannte Metriken als Qualitätsmaß eingeführt. Es wird deren Eignung zur Bewertung und zum Vergleich von Taktverteilungen untersucht. Für verschiedene herausgearbeitete Einsatzgebiete wird jeweils eine als optimal angesehene Metrik ausgewählt.

Eine wesentliche Aufgabe innerhalb dieser Arbeit ist die Untersuchung existierender Schutzalgorithmen in Kapitel 8. Hier werden zum einen Transportschutzverfahren in rahmen- und paketvermittelten Netzen analysiert, zum anderen die von ITU und ETSI spezifizierten Synchronisationsschutzverfahren (siehe Abschnitt 8.8).

Zur Verifikation der neuentwickelten Verfahren wurde eine Simulationsumgebung erstellt, welche die wesentlichen Aspekte des synchronen digitalen Übertragungssystems modelliert. Diese Simulationsumgebung wird in Kapitel 9 beschrieben.

Kapitel 10 beinhaltet den Kern der Untersuchungen. Es wird eine neue Klasse von Synchronisationsschutzverfahren beschrieben, welche alle gestellten Anforderungen an solche Verfahren erfüllen. Dies wird durch Vergleich mit den existierenden Verfahren auf Basis der definierten Bewertungsmaßstäbe verifiziert sowie durch Simulation einer Software-Referenzimplementierung.

Das Abschlußkapitel 11 beinhaltet eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung und einen Ausblick auf weitere Aufgaben.

Kapitel 2

Digitale Telekommunikationsnetze

2.1 Einleitung

Ziel dieses Kapitels ist zum einen die thematische Einbettung der Synchronisation und des Synchronisationsschutzes in die Gesamtheit der in Telekommunikationsnetzen existierenden Aufgaben. Dazu erfolgt in Abschnitt 2.3 eine Strukturierung dieser Aufgaben gemäß dem ISO/OSI Schichtenmodell.

Zum anderen werden in Abschnitt 2.4 wesentliche Grundbegriffe des Aufgabengebiets der Synchronisation definiert. Mit deren Hilfe werden anschließend in Abschnitt 2.5 die typischen Steuerungsarten digitaler Übertragungsmethoden dargestellt.

2.2 Netzfunktionen

Die Hauptaufgabe eines jeden Telekommunikationsnetzes ist die Übertragung von Daten; diese wird durch die *Transportfunktion* realisiert. In synchronen Netzen kommt zudem die *Synchronisationsfunktion* hinzu, welche die Arbeitstakte aller Netzknoten an eine zentrale Taktquelle angleicht (synchronisiert) und somit der Transportfunktion zuarbeitet.

Die Art der übertragenen Daten ist je nach Einsatzgebiet des Netzes sehr verschieden. Gerade in der Prozeßdatenkommunikation, deren Aufgabe die Überwachung und Steuerung von Industrieprozessen ist, können Verfügbarkeit und Latenz der Kommunikation je nach übertragenem Dienst eine große Rolle spielen. Insbesondere der *Netzschutz* in Hoch- und Mittelspannungsnetzen unterliegt harten Echtzeitanforderungen; Fehlerzustände zwischen Stationen müssen innerhalb von Millisekunden erkannt werden, so daß ein Lastabwurf ausgelöst werden kann. Im Gegensatz dazu sind die Echtzeitanforderungen beim Auslesen von Zählerständen vergleichsweise gering. Der Schutz es zu überwachenden Prozesses kann allgemein als *Prozeßschutz* bezeichnet werden.

Zur Erhöhung der Verfügbarkeit eines Telekommunikationsnetzes bedarf es eines Verfahrens, das Störungen der Kommunikationspfade erkennt und den Datenverkehr über ungestörte Netzressourcen (Ersatzwege) leitet. Dies ist die Aufgabe des *Transportschutzes*. Dabei übertragen sich die Echtzeitanforderungen des Dienstes auf die Transportschutzfunktion; im Fall des Netzschutzes müssen Ersatzwege so schnell einrichtet werden können, daß einer Prozeßstörung immer noch in hinreichender Zeit begegnet werden kann.

Gleichermaßen von Störungen der Netzressourcen betroffen ist die Taktverteilung, deren Ausfall die Zuverlässigkeit der Transportfunktion beeinträchtigt und die durch den *Synchronisationsschutz* aufrechterhalten wird. Es ist zu untersuchen, ob der Synchronisationsschutz ähnlichen Echtzeitanforderungen unterliegt wie der Transportschutz.

Gemeinsam gewährleisteten Transport- und Synchronisationsschutz die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Transportfunktion.

2.3 ISO/OSI Schichtenmodell

Synchronisation und Synchronisationsschutz sind nur einige der sehr komplexen in Kommunikationsnetzen auftretenden Aufgaben. Angefangen bei der Modulation der Daten über die Wegefindung bis hin zum Aufbau logischer Verbindungen oder der Realisierung von Anwendungsfunktionen existiert noch eine Vielzahl weiterer Leistungen, die ein solches Netz erbringen muß.

Um diese Aufgaben übersichtlich erfassen und implementieren zu können, wird das System in überschaubare Teilsysteme, Schichten genannt, untergliedert. Als Referenz für Kommunikationssysteme hat sich hier das 1977 spezifizierte *OSI Schichtenmodell* durchgesetzt¹ [Fli06], [BG00], [Tan98]. Bevor Synchronisation und der Synchronisationsschutz in dieses Gefüge eingeordnet werden, erfolgt zunächst eine kurze Einführung in das Schichtenmodell.

Das Modell zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

klar definiert Jede Schicht erfüllt eine klar definierte Aufgabe (Medienzugriff, Verschlüsselung, etc.).

hierarchisch Jede Schicht stützt sich bei der Erledigung ihrer Aufgabe auf die Funktionsfähigkeit der darunterliegenden Schicht.

symmetrisch Zu jeder Schicht im Sender existiert eine entsprechende Schicht im Empfänger, welche dieselbe Aufgabe in Empfangsrichtung wahrnimmt.

Abbildung 2.1 zeigt eine erweiterte Version des OSI Schichtenmodells, bei dem die Schicht 2 nochmals unterteilt ist. System A verwendet dabei die deutschen und System B die englischen Begriffe.

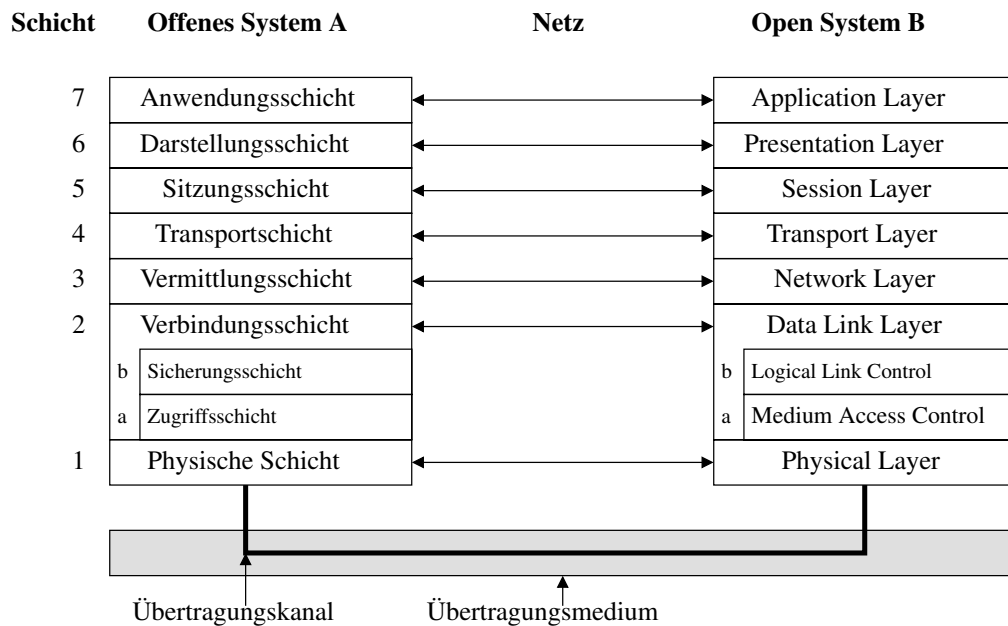


Abbildung 2.1: Erweitertes ISO/OSI Schichtenmodell

¹Die *OSI (Open Systems Interconnection) Initiative* ist ein Zusammenschluß von *ISO (International Organization for Standardization)* und *ITU (International Telecommunication Union)*.

Insbesondere die Aufgaben der untersten drei Schichten sind aus verschiedenen Gründen für die Thematik der Synchronisation von Bedeutung. Bezüglich der Aufgaben der höheren Schichten sei auf die Literatur verwiesen [BG00].

Physische Schicht

- Steuerung des Zugriffs auf Übertragungsmedien und Übertragungsverfahren (z.B. Modulation und Demodulation, Synchronisation, etc.)
- Leitungskodierung
- Spezifizierung der mechanischen und elektrischen Schnittstellen

Zugriffsschicht (engl. *Medium Access Control, MAC*)

- Reservierungsverfahren beim Zugriff auf das Medium (Wettbewerbsverfahren, Zuteilungsverfahren, Multiplexbildung)
- Physische Adressierung (*MAC Adresse*)
- Vermittlung (engl. *switching*)

Sicherungsschicht (engl. *Logical Link Control, LLC*)

- Flußkontrolle (engl. *Flow Control*)
- Fehlererkennung (ggf, Fehlerkorrektur)
- ggf. Melden des Verbindungsstatus an Managementprozesse (z.B. PCM30/PDH/SDH-Systeme)
- ggf. Automatische Rahmenwiederholung (engl. *Automatic Repeat Request, ARQ*)

Vermittlungsschicht

- Logische Adressierung (z.B. IP Adresse)
- Wegesuche (engl. *Routing*)

Die *Synchronisation* einer Datenübertragung, also die Übertragung eines Taktsignals, ist die Aufgabe der *physischen Schicht* (Schicht 1). Wie beispielsweise an der Beschreibung des Empfangsprozesses des ISPN Systems in Abschnitt 4.7 zu erkennen ist, können alle höheren Schichten dann auf das empfangene Taktsignal zur Steuerung ihrer Funktionen zurückgreifen.

Die tiefste Schicht, in der *Synchronisationsschutz* realisiert werden kann, ist die *Sicherungsschicht* (Schicht 2b). Diese beinhaltet bereits zusätzlich zu den Nutzdaten Information zur Steuerung und Überwachung einer Verbindung. Wie in Abschnitt 8.8.3 gezeigt wird, sind jedoch auch Lösungen auf Ebene der Anwendungsschicht denkbar.

Die *Zugriffsschicht* und *Vermittlungsschicht* erfüllen zwar bezüglich der Synchronisation selbst keine Aufgabe, wie jedoch in den Abschnitten 8.9.1 und 8.6 gezeigt wird sind die in diesen Schichten eingesetzten Mechanismen zur Vermittlung und Wegfindung von großem Interesse bei der Entwicklung von Synchronisationsschutzalgorithmen.

2.4 Eigenschaften von Steuersignalen

Naturgemäß erfordert digitale Datenübertragung empfangsseitig einen Abtast- und sendeseitig ein Rekonstruktionsvorgang. Beide Vorgänge wandeln kontinuierliche und zeitdiskrete Signale ineinander um. Umwandlungsprozesse sowie alle in der digitalen Domäne ablaufenden Verarbeitungsschritte bedürfen somit einer zeitlichen Steuerung. Diese erfolgt mit Hilfe von *Taktsignalen*. Daher werden in diesem Abschnitt die grundlegenden Eigenschaften von Taktsignalen sowie die sich bei Generierung und Verteilung ergebenden Probleme dargestellt.

2.4.1 Charakterisierung von Taktsignalen

Die folgenden beiden Unterabschnitte definieren die charakteristischen Eigenschaften von Taktsignalen sowie die möglichen Beziehungen von Taktsignalen zueinander. Dies erfolgt in Anlehnung an entsprechende Standards und Empfehlungen internationaler Normierungsgremien sowie ausgewählter Fachliteratur [Bre02], [103], [ati01], [itu93].

Eigenschaften von Taktsignalen

Definition 2.4.1 (Taktsignal und Taktrückgewinnung) Ein Taktsignal (engl. clock oder timing signal) ist ein periodisches Signal, das zur Steuerung des zeitlichen Ablaufs von Aktionen dient. Taktrückgewinnung oder Taktregenerierung (engl. timing oder clock recovery) ist der Prozeß, das zu einem empfangenen digitalen Signal zugehörige Taktsignal zu bestimmen. Aufgrund unvermeidlicher Störungen, wie etwa Phasenfluktuationen des Oszillators, sind reale Taktsignale stets pseudo-periodisch, das heißt die Periodenlänge unterliegt leichten Variationen.

Die Zustände des Taktsignals, die eine Aktion auslösen, werden im zeitlichen Signalverlauf als *signifikante Zeitpunkte* bezeichnet. Darüberhinaus ist die Signalform nicht von Bedeutung. Insofern läßt sich ein Taktsignal auch als eine Folge von Pulsen darstellen. Abbildung 2.2 zeigt einige äquivalente Taktsignale, einschließlich einer Pulsdarstellung (Signal (c)), mit Abstand T zwischen den signifikanten Zeitpunkten.

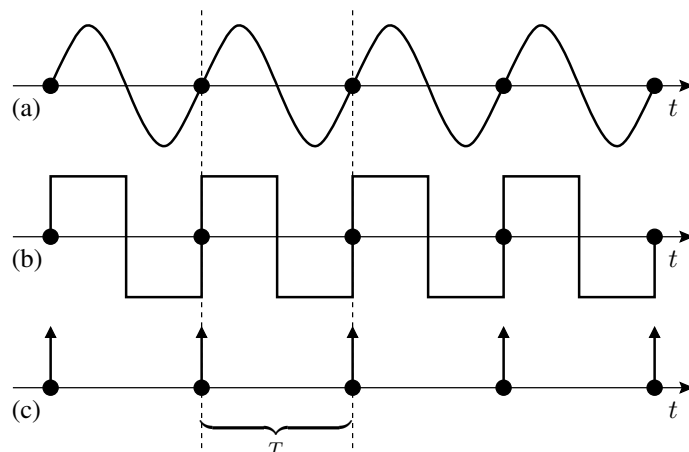


Abbildung 2.2: Taktsignale

Taktsignale lassen sich in zwei Hauptklassen unterteilen:

isochron Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden signifikanten Zeitpunkten ist stets ein ganzzahliges Vielfaches des kürzesten Abstands. Beträgt das Vielfache stets genau 1, so handelt es sich um ein *reguläres* Taktsignal.

anisochron Ein Taktsignal, das nicht isochron ist, bei dem also die Abstände zwischen den signifikanten Zeitpunkten nicht gleich lang bzw. keine ganzzahligen Vielfachen des kürzesten Abstands sind, heißt anisochron.

Ein sehr anschauliches Beispiel für die unterschiedlichen Klassen ist die sogenannte *Pulsdauermodulation (PDM)*², bei der im Gegensatz zur isochronen *Pulscode modulation (PCM)* 0 und 1 nicht durch verschiedene Codes, sondern durch Pulse verschiedener Länge kodiert werden³.

²engl. *pulse-width modulation*, PWN

³Bei ganzzahligem Modulationsverhältnis wäre allerdings auch ein PDM Signal als isochron zu betrachten. Davon kann jedoch im allgemeinen nicht ausgegangen werden.

Beziehungen zwischen Signalen

Wie in Abschnitt 2.4.2 gezeigt wird, ergeben sich aus der Beziehung der Taktsignale kommunizierender Knoten direkte Konsequenzen für die Qualität der Datenübertragung. Bevor diese Konsequenzen näher untersucht werden, sollen die möglichen Beziehungen genauer betrachtet werden.

In der Literatur finden sich verschiedene Begriffe zur Charakterisierung der Beziehung zwischen Signalen, die sich, motiviert durch den jeweiligen Anwendungskontext, in ihrer Bedeutung zum Teil stark unterscheiden.

Eine sehr formale Definition bietet der Federal Standard 1037C [103]. Dieser bezeichnet beim simultanen Auftreten der signifikanten Zeitpunkte zwei Signale als *synchron*, bei konstanter Phasenverschiebung als *homochrom*. Eine lediglich im Durchschnitt gleiche Frequenz kennzeichnet *mesochrone* Signale. Sind die Frequenzen nominell verschieden, so werden die Signale als *heterochron* bezeichnet. Im Hinblick auf reale Systeme werden *plesiochrone* Signale definiert, deren Frequenzen nominell gleich sind, tatsächlich jedoch eine leichte Abweichung aufweisen.

ITU-T Rec. G.701 [itu93] hingegen bezeichnet zwei Signale, deren entsprechende signifikante Zeitpunkte mit genau derselben durchschnittlichen Rate auftreten, als *synchron* oder synonym als *mesochron*. Die Empfehlung faßt damit die gleichnamigen Klassen des Federal Standard 1037C in einer Klasse zusammen.

In [Bre02] werden für *synchrone* Signale wie bei der ITU Empfehlung (bzw. wie für mesochrone Signale des Federal Standards) eine im Durchschnitt gleiche Frequenz gefordert, jedoch mit einer konstanten Phasenverschiebung.

Im Rahmen der folgenden Untersuchungen wird in Anlehnung an die ITU Empfehlung eine pragmatische Definition der *Synchronität* zweier Signale verwendet:

synchron Zwei Signale heißen in einem gegebenen System genau dann *synchron* (zueinander), wenn das Verhältnis der durchschnittlichen Frequenz beider Signale konstant ist. Die konkreten Abweichungen sind dabei derart begrenzt, daß der von den Signalen gesteuerte Prozeß uneinträchtigt ablaufen kann. Mithin sind also Phasenrauschen und Phasenverschiebung (siehe Abschnitt 2.4.2) innerhalb gewisser Grenzen erlaubt.

Diese Definition bettet die Synchronität zweier Signale in den Kontext eines gegebenen Systems ein. Wie Abschnitt 3.3.5 zeigt, hängt die Größe kompensierbarer temporärer Abweichungen beispielsweise von Systemparametern wie der Empfangspuffergröße ab. Insbesondere sind also auch jitterbehaftete Signale, wie sie laut Abschnitt 2.4.2 in realen Systemen vorkommen, noch als synchron anzusehen, da die Abweichungen keine signifikante Auswirkung haben. Eine weitere wesentliche Eigenschaft ist die Miteinbeziehung von Signalen verschiedener Frequenz. Diese von ITU und der General Services Administration als heterochron definierte Beziehung spielt gerade in den in Abschnitt 3.4 vorgestellten hierarchisch aufgebauten synchronen Systemen eine große Rolle. Dort müssen Takte verschiedener Frequenzen aufeinander abgestimmt, also synchronisiert werden.

Unverändert übernommen wird die Definition *plesiochrone Signale*:

plesiochron Zwei plesiochrone Signale sind *nominell* synchron, haben aber tatsächlich leicht voneinander abweichende Frequenzen, typischerweise in der Größenordnung einiger *ppm*. Die Ursache hierfür liegt in der Unvollkommenheit realer Taktquellen, beispielsweise bedingt durch Fertigungsvarianzen und Alterungsprozesse der Quarze oder der Temperaturabhängigkeit des Schwingungsvorgangs.