Teil I – Datenübertragung

Grundlagen über Medien, Signale, Bits, Träger und Modems

KAPITEL 4

Übertragungsmedien

4.1 Einleitung

Auf der untersten Ebene betrifft die gesamte Computerkommunikation das Kodieren von Daten in eine Energieform und das Senden der Energie über ein Übertragungsmedium. Beispielsweise lässt sich elektrischer Strom nutzen, um Daten über eine Leitung zu übertragen. Mit Radiowellen können Daten durch die Luft übertragen werden. Da die an einen Rechner angeschlossenen Hardwaregeräte die Kodierung und Dekodierung von Daten ausführen, brauchen sich die Programmierer und Benutzer nicht um die Details der Datenübertragung zu kümmern. Andererseits ist die solide Kenntnis einiger grundlegender Konzepte der Datenübertragung wichtig, weil Kommunikationssoftware unter anderem die wichtige Aufgabe hat, in der zugrunde liegenden Hardware entstehende Fehler zu korrigieren.

Dieser Teil beschreibt die Grundlagen der Datenübertragung. Im ersten Kapitel werden die Medien betrachtet, die in modernen Netzwerksystemen zur Übertragung eingesetzt werden. In den nächsten zwei Kapiteln wird erklärt, wie Daten über diese Medien übertragen werden. In weiteren Kapiteln wird beschrieben, wie die Übertragung die Grundlage der Datenvernetzung bildet.

4.2 Kupferkabel

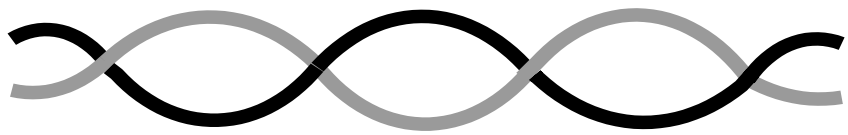
In konventionellen Rechnernetzen werden als primäres Medium Kabel eingesetzt, um die einzelnen Rechner zu verbinden, weil Kabel preisgünstig und einfach zu verlegen sind. Diese Kabel können aus verschiedenen Metallen bestehen, *Kupferkabel* sind jedoch bei den meisten Netzen das bevorzugte Medium, weil der geringe elektrische Widerstand von Kupfer bedeutet, dass Signale größere Strecken zurücklegen können.

Die für Rechnernetze verwendeten Kabel werden mit dem Ziel minimaler Interferenz ausgewählt. Interferenz entsteht, weil sich ein elektrisches Signal, das sich in einem Kabel ausbreitet, wie eine »Miniradiostation« verhält – das Kabel strahlt elektromagnetische Energie in kleinen Mengen ab, die durch die Luft reisen kann. Stößt diese auf ein anderes Kabel, erzeugt eine elektromagnetische Welle einen geringen elektrischen Strom im Kabel. Die Stärke des erzeugten Stroms hängt von der Stärke der elektromagnetischen Welle und der physischen Position des Kabels ab. Normalerweise kommen sich Kabel nicht nahe genug, um problematische Interferenzen zu verursachen. Liegen zwei Kabel z. B. in rechten Winkeln nahe beieinander, ist der in einem Kabel erzeugte Strom

fast nicht spürbar, wenn im anderen ein Signal durchläuft. Bei nahe und parallel liegenden Kabeln bewirkt ein starkes Signal in einem Kabel ein ähnliches Signal im anderen. Da Computer nicht zwischen solchen zufällig erzeugten Signalen und normalen Übertragungen unterscheiden können, kann der erzeugte Strom potentiell die Datenkommunikation stören oder unterbrechen. Leider ist das Problem mit Interferenzen nicht unerheblich, weil Kabel eines Datennetzwerks oft parallel mit zahlreichen anderen Kabeln verlegt werden, beispielsweise den Kabeln eines anderen Netzwerks.

Um die Interferenz zu minimieren, werden in Rechnernetzen vorwiegend zwei Kabelarten verwendet: *verdrillte Kabelpaare* und *Koaxialkabel*. Verdrillte Kabelpaare sind auch das Medium des konventionellen Telefonsystems. Der Begriff entstand, weil jeder Draht mit einem Isoliermaterial (z. B. Kunststoff) ummantelt wird und ausschließlich ein Paar verdrillt wird (siehe Abbildung 4.1).

Abbildung 4.1 Beim verdrillten Kabelpaar wird jeder Draht mit einem Isoliermaterial beschichtet, damit sich das Metall der Drähte nicht berührt. Anschließend wird je ein Drahtpaar verdrillt, um die Interferenz zu verringern.

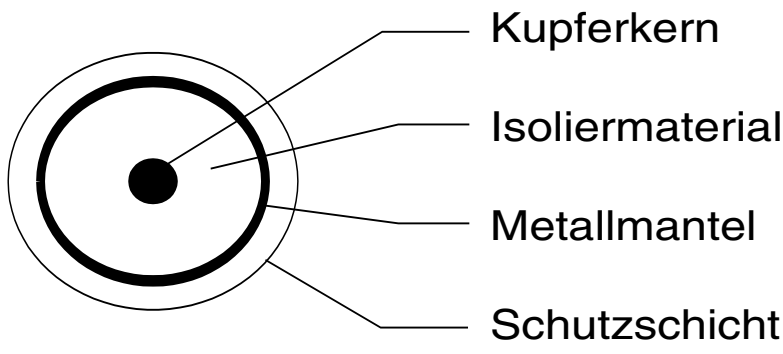


Durch das einfache Konzept der Verdrillung ändern sich die elektrischen Eigenschaften des Kabels, so dass es sich für die Verwendung in einem Datennetz besser eignet. Einerseits wird dadurch die elektromagnetische Energie eingeschränkt, die das Kabel abstrahlt und in anderen Kabeln Störungen bewirken kann. Andererseits werden die gleichen Wirkungen auf das Kabel durch andere Einflüsse verhindert.

Die zweite Art der Kupferverkabelung in Datennetzen ist das *Koaxialkabel* (kurz Koaxkabel). Dieses Medium wird in der konventionellen Fernsehtechnik eingesetzt. Das Koaxkabel bietet noch mehr Schutz vor Störungen als das verdrillte Kabelpaar. Es besteht aus einem einzigen Kabel, das mit einem stärkeren Metallmantel umhüllt ist (siehe Abbildung 4.2).

Die Ummantelung des Koaxialkabels bildet einen flexiblen Metallzylinder um den Kupferkern, der als Abschirmung gegen elektromagnetische Abstrahlung dient. Diese Abschirmung isoliert den Kupferkern auf zwei Arten: Sie schützt den Draht vor elektromagnetischer Energie von außen und hindert die Signale im Kupferdraht an der Abstrahlung elektromagnetischer Energie, die sich auf andere Kabel auswirken könnte. Die Ummantelung ist beim Koaxialkabel besonders wirksam, weil sie den Kupferkern auf allen Seiten gleichmäßig umhüllt. Das Kabel kann parallel mit anderen Kabeln verlegt werden. Es ist trotz seiner Stärke biegsam, ohne die Wirkung des Metallmantels zu beeinträchtigen.

Abbildung 4.2 Vergrößerter Querschnitt eines Koaxialkabels. Trotz des starken Mantels lässt sich das Koaxkabel gut biegen.



Das Konzept der Abschirmung von Kabeln wird auch auf das verdrillte Kabelpaar angewandt. Ein *abgeschirmtes verdrilltes Kabelpaar* besteht aus einem Leiterpaar, das von einem Metallmantel umhüllt ist. Jeder Leiter ist mit einem Isoliermaterial beschichtet, so dass sich das Metall der verdrillten Leiter nicht berührt. Der Mantel bildet lediglich eine Sperre gegen elektromagnetische Strahlung von außen und innen. Die zusätzliche Abschirmung beim Koaxialkabel und beim abgeschirmten verdrillten Kabelpaar ist besonders vorteilhaft bei vernetzten Anlagen in unmittelbarer Umgebung von Geräten, die starke elektrische oder magnetische Felder erzeugen (z. B. große Klimaanlagen).

4.3 Lichtwellenleiter

In Rechnernetzen wird zur Übertragung von Daten auch *Glasfaser* eingesetzt. Glasfaser (auch *Lichtwellenleiter* genannt) ist ein Medium, bei dem die Daten durch Licht übertragen werden. Die winzige Glasfaser ist von einer Kunststoffhülle umgeben, die sicherstellt, dass das Kabel ohne Risiko eines Kabelbruchs gebogen werden kann.[1] Ein Sender an einem Ende der Glasfaser nutzt eine *lichtemittierende Diode* (*LED*) oder eine *Laserdiode*, um Lichtimpulse durch das Kabel zu leiten. Ein Empfänger am anderen Ende nutzt einen lichtempfindlichen Transistor, um die Impulse zu erkennen.

Glasfaserkabel haben im Vergleich zu den anderen Kabelarten vier entscheidende Vorteile. Erstens kann die Glasfaser nie elektrische Störungen in anderen Kabeln verursachen, weil sie auf Licht basiert, und sie kann ihrerseits nicht durch elektrische Störungen beeinträchtigt werden. Zweitens befördern Glasfaser einen Lichtimpuls viel weiter, als das Kupferkabel ein Signal transportieren kann. Drittens kann Glasfaser mehr Informationen als Metallkabel übermitteln, weil Licht mehr Daten kodieren kann als elektrische Signale. Viertens kann

1 Glasfaser kann nicht im rechten Winkel geknickt, jedoch zu einem Kreis mit einem Durchmesser von weniger als 5 cm gebogen werden.

Licht von einem Computer zum anderen in einer einzelnen Faser reisen, während Elektrizität immer ein Leiterpaar voraussetzt, um einen geschlossenen Kreis zu bilden.

Neben diesen Vorteilen haben Glasfaserkabel aber auch Nachteile. Erstens setzt die Installation von Glasfaserkabeln spezielle Werkzeuge voraus, mit denen die Kabelenden poliert werden, damit Licht durchströmen kann. Zweitens ist es schwierig, im Fall eines Kabelbruchs in der Kunststoffhülle (z. B. durch Biegen in einem rechten Winkel) die Bruchstelle zu finden. Drittens ist die Reparatur eines Glasfaserkabels schwierig, weil spezielles Werkzeug erforderlich ist, um zwei Fasern wieder so zusammenzufügen, dass Licht durch die Bruchstelle dringt.

4.4 Funk

Die für die Radio- und Fernsehübertragung und die private Kommunikation über Geräte wie Mobiltelefone benutzte elektromagnetische Strahlung lässt sich auch zur Übertragung von Daten nutzen. Einfach ausgedrückt, funktioniert ein Netzwerk, das elektromagnetische Radiowellen zur Übertragung benutzt, auf *Hochfrequenz*. Die Übertragung über dieses Medium bezeichnet man als *RF-Übertragung*. Im Gegensatz zu Netzwerken mit Kupfer- oder Glasfaserkabeln setzen Netzwerke, die mit RF-Übertragungen arbeiten, keine direkte physische Verbindung zwischen den Computern voraus. Stattdessen wird jeder im Netz teilnehmende Rechner an eine Antenne angeschlossen, die Hochfrequenz senden und empfangen kann.

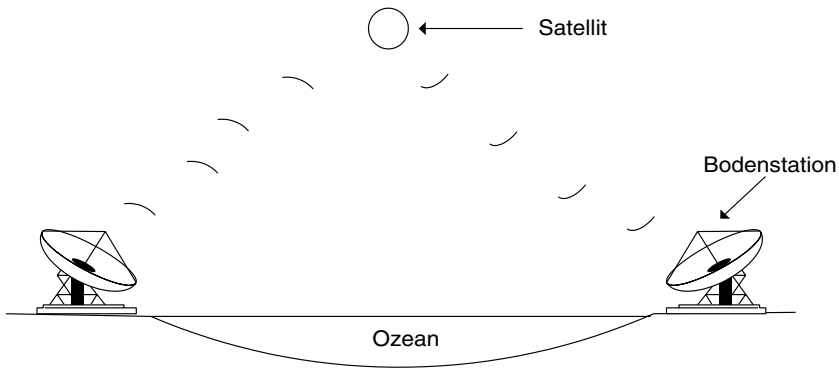
Die in RF-Netzen benutzten Antennen können groß oder klein sein, je nach abzudeckendem Bereich. Eine zur Verbreitung von Signalen über mehrere Kilometer innerhalb eines Stadtgebiets benutzte Antenne kann beispielsweise aus einem Metallmast bestehen, der etwa zwei Meter lang und auf dem Dach eines Gebäudes montiert ist. Eine zur Kommunikation innerhalb eines Gebäudes ausgelegte Antenne kann so klein sein, dass sie in einen tragbaren Computer passt.

4.5 Satelliten

Funkübertragungen krümmen sich in ihrem Verlauf zwar nicht rund um die Oberfläche der Erde, die RF-Technologie lässt sich jedoch mit Satelliten kombinieren, um große Übertragungsstrecken abzudekken. Abbildung 4.3 zeigt in einem Beispiel, wie durch einen Übertragungssatelliten in der Umlaufbahn um die Erde eine Netzverbindung über einen Ozean zustande kommt. Der Satellit enthält einen so genannten *Transponder*, der aus einem Radiosender und -empfänger besteht. Der Transponder nimmt eine ankommende Funkübertragung an, verstärkt sie und überträgt das verstärkte Signal in einem Winkel, der sich geringfügig von dem unterscheidet, in dem es angekommen ist, zum Boden zurück. Eine Bodenstation auf einer Seite des Ozeans überträgt ein Signal an den Satelliten, der das Signal an die Bodenstation auf der anderen Seite sendet. Da die Stationierung eines Übertragungssatelliten in der Umlaufbahn (Orbit) teuer ist, beinhaltet ein Satellit in der Regel mehrere Transponder (meist sechs bis zwölf), die unabhängig voneinander arbeiten. Jeder Transponder nutzt eine andere Funkfrequenz (d. h. Kanal), so dass mehrere Übertragungen gleichzeitig

stattfinden können. Ein einzelner Satellit kann somit Verbindungen für viele Kunden bereitstellen, weil jedem Kunden ein bestimmter Kanal zugewiesen wird.

Abbildung 4.3 Ein Satellit empfängt Funksignale von einer Bodenstation und sendet sie an die andere.



4.6 Geostationäre Satelliten

Kommunikationssatelliten lassen sich entsprechend der Höhe, in der sie kreisen, in Kategorien gruppieren. Der am leichtesten verständliche Typ ist der so genannte *geosynchrone* oder *geostationäre* Satellit. Die Bezeichnung entstand, weil ein geostationärer Satellit in einem Orbit positioniert wird, der genau synchron mit der Umdrehung der Erde ist. Ein solcher wird als *geostationärer Erdorbit* (*GEO*) bezeichnet, weil die Satelliten aus Sicht des Erdbetrachters keine relative Bewegung haben; sie scheinen stillzustehen. Ein geostationärer Satellit in einer Umlaufbahn über der Äquatorlinie des Atlantischen Ozeans kann z. B. benutzt werden, um jederzeit Übertragungen zwischen Europa und Nordamerika zu vermitteln, weil der Satellit am gleichen Punkt über dem Ozean bleibt.

Die Gesetze der Physik bestimmen die genaue Entfernung von der Erde, in der ein Satellit kreisen muss, um mit der Erdumdrehung[2] synchron zu bleiben. Die für den geostationären Orbit erforderliche Entfernung beträgt ungefähr 35.785 km.[3] Ingenieure bezeichnen die Entfernung auch als *hohen Erdorbit*.

Interessanterweise ist im geostationären Orbit oberhalb des Äquators existiert ein begrenzter »Raum«, weil die in einer bestimmten Frequenz arbeitenden Kommunikationssatelliten voneinander getrennt sein müssen, um Interferenz zu vermeiden. Der Mindestabstand hängt von der Leistung der Sender ab, setzt aber generell einen Winkelabstand zwischen 4 und 8 Grad voraus. Folglich kön-

2 Einzelheiten finden sich in den *Keplerschen Gesetzen*.
3 Der geostationäre Orbit liegt auf etwa einem Zehntel der Entfernung zum Mond.

nen in der gesamten 360-Grad-Bahn über dem Äquator nur 45 bis 90 Satelliten positioniert werden.

4.7 LEO-Satelliten

Eine zweite Kategorie von Kommunikationssatelliten arbeitet im so genannten *Low Earth Orbit* (*LEO*). Das bedeutet, dass sie einige hundert Kilometer über der Erde kreisen (normalerweise zwischen 700 und 1.500 km). Der größte Nachteil eines niedrigen Orbits ist die Geschwindigkeit, in der sich die Satelliten bewegen müssen. Da ihr Umdrehungsintervall schneller als die Erdumdrehung ist, behalten Satelliten in niedrigen Orbits ihre Position über der Erdoberfläche nicht bei. Für den Erdbeobachter mit einem Teleskop scheinen sie sich vielmehr am Himmel zu bewegen. Tatsächlich kann ein einzelner Satellit einen gesamten Orbit in ungefähr 1,5 Stunden umkreisen.

Aus Sicht des Kommunikationsanbieters verursacht ein Satellit, der nicht stationär zu bleiben scheint, Probleme. Erstens kann er nur während der Zeit benutzt werden, in der sein Orbit zwischen zwei Bodenstationen kreist. Zweitens setzt seine maximale Auslastung komplexe Steuersysteme voraus, die die Bodenstationen ständig bewegen, damit sie direkt auf den Satelliten ausgerichtet bleiben.

4.8 LEO-Satelliten-Arrays

Ein interessantes Schema wurde erfunden, das die ständige Kommunikation durch Satelliten im niedrigen Orbit erlaubt. Statt sich auf einen Satelliten zu konzentrieren, muss eine Telekommunikationsgesellschaft eine Reihe von Satelliten in niedrige Orbits starten. Auch wenn ein bestimmter Satellit schnell kreist, werden die Orbits so gewählt, dass jeder Punkt auf der Erde jeweils von mindestens einem Satelliten abgedeckt wird (66 Satelliten sind erforderlich, um Dienste über die gesamte Erdoberfläche bereitzustellen). Aus Sicht des Erdbeobachters scheint es, dass der Satellit an einem Punkt am Horizont auftaucht und am entgegengesetzten Ende wieder verschwindet. Der Kern dieses Schemas liegt in der Orbitanordnung, die gewährleistet, dass immer mindestens ein Satellit verfügbar ist.

Zusätzlich zu den für die Kommunikation mit Bodenstationen benutzten Transpondern umfasst ein Satelliten-Array im niedrigen Orbit Funkanlagen für die Kommunikation mit anderen Satelliten im selben Array. Während ihrer Bewegung im jeweiligen Orbit kommunizieren die Satelliten miteinander und einigen sich auf die Weiterleitung von Daten. Angenommen ein Satellit über Europa empfängt zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Übertragung von einer Bodenstation in Deutschland, bestimmt für einen Standort in den USA. Der empfangende Satellit kann die Übertragung an einen anderen Satelliten weiterleiten, der sie wiederum an einen abgibt, der eine Bodenstation in den USA nahe dem Ziel erreichen kann. Mit der Zeit bewegen sich die Satelliten weiter und neue treten an ihre Stelle, was bedeutet, dass eine spätere Übertragung aus Deutschland für die USA möglicherweise durch drei andere Satelliten im Array fließt.

4.9 Mikrowelle

Elektromagnetische Strahlung oberhalb des für Radio und Fernsehen benutzten Frequenzbereichs kann auch zur Beförderung von Informationen verwendet werden. Viele Telefongesellschaften nutzen Mikrowellenübertragungen vor allem für Ferngespräche. Einige große Unternehmen haben auch Kommunikationssysteme auf Mikrowellenbasis als Teil ihres Netzsystems installiert.

Bei Mikrowellen handelt es sich zwar um eine Version von Radiowellen mit höherer Frequenz, sie verhalten sich aber anders. Statt in alle Richtungen zu senden, lässt sich die Übertragung über Mikrowellen in eine Richtung ausrichten, so dass Dritte daran gehindert werden, das Signal abzufangen. Darüber hinaus kann die Mikrowelle mehr Informationen als RF-Übertragungen befördern. Da Mikrowellen aber keine Metallstrukturen durchdringen können, funktioniert die Mikrowellenübertragung am besten, wenn zwischen Sender und Empfänger keine Hindernisse existieren. Folglich bestehen die meisten Mikrowelleninstallationen aus zwei Türmen, die höher als die Gebäude und Bäume des Einzugsbereichs und jeweils mit einem Mikrowellensender ausgestattet sind, der direkt auf einen Mikrowellenempfänger des anderen Turms ausgerichtet ist.

4.10 Infrarot

Die schnurlosen Fernsteuerungen, die für zahlreichen Geräte wie Fernseher und Stereoanlagen benutzt werden, kommunizieren über *Infrarotstrahlen*. Infrarotübertragungen sind auf einen kleinen Bereich (z. B. auf einen Raum) begrenzt und setzen normalerweise voraus, dass der Sender auf den Empfänger ausgerichtet ist. Infrarothardware ist vergleichsweise preisgünstig und erfordert keine Antenne.

Für Rechnernetze kann die Infrarottechnik zur Datenübertragung genutzt werden. So ist es z. B. möglich, einen großen Raum mit einem einzigen Infrarotanschluss auszustatten, der allen im Raum befindlichen Computern Zugang zum Netz bereitstellt. Die Computer bleiben mit dem Netz in Verbindung, auch wenn sie innerhalb des Raums umgestellt werden. Infrarotnetze sind besonders praktisch für kleine tragbare Computer, weil Infrarot den Vorteil hat, dass weder Kabel noch Antennen erforderlich sind. Das bedeutet, dass in einem Computer, der die Infrarottechnik nutzt, die gesamte Kommunikationshardware integriert ist.

4.11 Laser

Vorher wurde bereits erwähnt, dass Licht benutzt werden kann, um über Glasfaser zu kommunizieren. Ein Lichtstrahl lässt sich auch verwenden, um Daten durch die Luft zu übertragen. Wie bei einem auf Mikrowellen basierenden Kommunikationssystem besteht eine auf Licht basierenden Übertragungsverbindung aus zwei Standorten, an denen jeweils ein Sender und ein Empfänger vorhanden sind. Die Anlage wird an einer festen Stelle – meist auf einem Turm – verankert und so ausgerichtet, dass der Sender eines Standorts seinen Lichtstrahl direkt an den Empfänger des anderen sendet. Der Sender benutzt einen

Laser, um den Lichtstrahl zu erzeugen, weil ein Laserstrahl über weite Entfernungen gerichtet bleibt.

Wie bei der Mikrowellenübertragung muss sich das Licht eines Laserstrahls in gerader Linie fortbewegen und darf nicht blockiert werden. Leider kann ein Laserstrahl keine Vegetation oder Wetterbedingungen wie Schnee und Nebel durchdringen. Aus diesem Grund findet die Nutzung der Laserübertragung keine größere Verbreitung.

4.12 Zusammenfassung

In Rechnernetzen werden verschiedene Übertragungsmedien verwendet, darunter Kupferkabel, Glasfaser, Funk, Mikrowellen, Infrarot und Laserstrahlen. Jedes Medium und jede Übertragungstechnik hat bestimmte Vor- und Nachteile. So bietet ein Infrarotsystem zwar Netzanschlüsse für Computer innerhalb eines Raums, jedoch ist ein Satellit erforderlich, um über einen Ozean drahtlos übertragen zu können.

ÜBUNGEN

4.1 Wie stark ist ein Koaxialkabel? Schneiden Sie von einem nicht benutzten Kabel die Isolierung an einem Ende auf. Überrascht Sie die Stärke der Abschirmung?

4.2 Finden Sie heraus, welche Netzanschlüsse an Ihrem Standort benutzt werden. Welche Medienarten werden verwendet?

4.3 Welche Medien können für einen Netzanschluss benutzt werden, der sich in der Nähe eines starken Elektromotors (z. B. einer Klimaanlage) befindet?

4.4 Einige kommerzielle Netzdienste bieten Satellitenverbindungen für Privatleute. Jeder Teilnehmer erhält eine kleine Antennenschüssel, über die Daten empfangen werden. Der Teilnehmer bekommt außerdem ein Modem, um Daten über eine Telefonleitung zu senden. Stellen Sie fest, warum ein Teilnehmer keine Daten an den Satelliten senden kann. Hinweis: Lesen Sie den Abschnitt über die Größe von Antennen, die zur Übertragung an einen Satelliten benutzt werden.

4.5 Wie biegsam ist Glasfaser? Stellen Sie fest, ob eine Faser bricht, wenn man das Kabel in einem Radius von 25 cm, 5 cm bzw. 1 cm biegt.

4.6 Verdrillten Kabelpaare mit höheren Kategorienummern unterstützen höhere Datenraten, wobei die Kategorie 5 derzeit der Standard für hohe Geschwindigkeit ist. Stellen Sie fest, ob an Ihrem Standort verdrillte Kabelpaare der Kategorie 5 verwendet werden.

4.7 Wie lange dauert es, bis ein Radiosignal einen Satelliten erreicht, der genau 32.000 km über der Erdoberfläche kreist, und wie lange dauert die Rücksendung des Signals (unter der Annahme, dass sich das Signal in Lichtgeschwindigkeit ausbreitet und der Satellit 53 Mikrosekunden braucht, um ein Signal erneut zu übertragen)?