

1 Einleitung

Prozeßdatennetze als integraler Bestandteil der Prozeßleittechnik befinden sich derzeit in einer strukturellen Umbruchsphase. Historisch betrachtet als proprietäre und auf den jeweiligen Einzelprozeß zugeschnittene Lösung konzipiert, geraten diese Ansätze immer mehr unter Rationalisierungsdruck, nicht zuletzt auch durch die zunehmende Globalisierung ebendieser Prozesse. Fehlende weltweit anerkannte Standards und Herstellerinkompatibilitäten erschweren die notwendige Vernetzung bislang unabhängiger Prozesse und verhindern somit Synergieeffekte. In der räumlich begrenzten Industrieautomation konkurrieren eine Vielzahl von Feldbussystemen miteinander, und im speziellen Teil der Weitverkehrsautomation ist die leitungorientierte Analogübertragung mittels Wechselstromtelegraphie insbesondere bei Versorgerunternehmen noch immer die Regel. Da die Entwicklung neuer Kommunikationssysteme, bedingt vor allem durch die sehr hohen Sicherheitsstandards in diesem sensiblen Bereich, extrem zeit- und kostenintensiv ist, wird die Übernahme von kommerziellen Technologien aus dem Massenmarkt unumgänglich sein. Diese Produkte verteilen die Entwicklungsaufwendungen auf eine sehr breite Basis und müssen nur noch durch spezifische Anpassungen industrietauglich gemacht werden. Durch den hohen Verbreitungsgrad und die unterschiedlichen Einsatzgebiete wird sichergestellt, daß die bei einer komplexen technischen Entwicklung immer auftretenden Fehler schnell detektiert und behoben werden. Demgegenüber stellen die in diesem Bereich üblichen, äußerst kurzen Produktzyklen einen gewissen Nachteil dar, da Investitionen bei Versorgungsunternehmen meist für Zeitbereiche von zehn und mehr Jahren getätigt werden. Bedingt durch die derzeitige Liberalisierung des Energiemarktes läßt sich jedoch gerade bei diesem Aspekt eine Trendwende erkennen, da immer häufiger und kurzfristiger Kommunikationsnetze mehrerer Unternehmen miteinander gekoppelt werden müssen.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit liegt in der Untersuchung der Eignung paketvermittelter Netzwerktechnologie, deren umfassendstes Einsatzbeispiel das allgegenwärtige Internet verkörpert, für den Einsatz bei Energieversorgern am Beispiel eines Gasversorgungsnetzes.

Ein solches Netz läßt sich mit zunehmender Komplexität immer weniger exakt beschreiben und vorhersagen, weil es dabei zunehmend eine Eigenschaft erhält, die als Survivability bezeichnet wird. Es verliert dabei an exakter Vorhersagbarkeit und gewinnt an Überlebensfähigkeit in Störungsfällen.

Da analytische Methoden aufgrund der Komplexität nur im Detail Anwendung finden können, werden größtenteils möglichst realitätsnahe Computersimulationen zur Erkenntnisgewinnung verwendet. Die dabei zum Einsatz kommenden Simulationsszenarien sind an ein existierendes Übertragungsnetz angelehnt und decken die meisten der in diesem Bereich vorkommenden Besonderheiten ab. Ziel dieser Arbeit ist es nicht, Simulationswerkzeuge zu entwickeln, sondern vielmehr durch den Einsatz vorhandener Tools neue Erkenntnisse zu gewinnen.

In Kapitel 1 wird die Prozeßdatenkommunikation in komplexen, geographisch weit verteilten Netzen am Beispiel eines überregionalen Gasversorgungsunternehmens dargestellt. Die Gewichtung liegt dabei auf der Abgrenzung zu anderen Kommunikationsnetzen und der Darstellung der Besonderheiten im Energiesektor.

Kapitel 2 formuliert mit dem Dienstgütemodell, inklusive der zugehörigen Quality of Service Parameter als grundlegenden Bewertungsmaßstab aller gewonnenen Erkenntnisse, die wesentlichsten Prämissen dieser Arbeit. Weiterhin werden sowohl die topologischen und technischen Strukturen, als auch die zu untersuchenden Protokolle und Verfahren vorgestellt und klassifiziert.

Aufbauend auf die aufgezeigten Techniken und Strukturen wird in Kapitel 3 das konkrete Prozeßmodell formuliert. Es folgt eine Darstellung der zum Einsatz kommenden Simulationssoftware opnet IT Guru einschließlich der Kriterien, die zu dieser Auswahl führten. Des weiteren wird die dem Simulationssystem zugrundeliegende Philosophie der Hardwaremodelle und deren Grenzen dargelegt, sowie die zur Bewertung der Ergebnisse notwendigen Metriken definiert.

Die Kapitel 4 und 5 bilden den Schwerpunkt dieser Arbeit. In ihnen wird das Verhalten realitätsnaher Netzwerke unterschiedlicher Topologien und unter Verwendung verschiedener Übertragungsprotokolle simuliert und ausgewertet. Zentrale Bewertungsgröße stellen dabei jeweils die Latenzzeiten der Netzleittechnikapplikationen dar. Um eine systematische Bewertung der Einzelergebnisse zu gewährleisten, gliedern sich die Simulationsszenarien in einen Bereich, der von einem konvergierten, störungsfreien Netz ausgeht und einem weiteren, der gezielt die Vorgänge vor, während und nach der Rekonvergenzphase untersucht. Im Mittelpunkt stehen dabei folgende Überlegungen:

Wie können die Aufgaben der Verkehrslenkung in einem paketorientierten Telematiknetz auf Komponenten der OSI-Layer III und II verteilt werden?

Wie verteilen sich die Durchlaufzeiten (*round trip time*) beim Datenverkehr zwischen Unterstationen und Zentralen in typischen Fernwirkapplikationen und welchen Einfluß haben die geographischen Standorte der Unterstationen?

In welchem Verhältnis steht der administrative „Eigenverkehr“ dynamischer Routingprotokolle zum Applikationsdatenaufkommen und wie reagieren diese Protokolle auf Überlastsituationen?

Welche Bandbreiten werden bei bekanntem Protokolloverhead und definiertem Netzverkehr (*payload*) benötigt und wie verhält sich die Latenz der Applikation bei Annäherung an die Grenzbandbreite?

Gibt es geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Latenzen, deren Mittelwert und Varianz?

Hat die Statistik der Informationsquellen, z.B. deren zeitliche Verteilungsfunktion, Einfluß auf die Latenzzeiten?

Wie wirken sich Streckenunterbrechungen und Ausfälle ganzer Netzknoten auf die Rekonvergenzzeit und die Sicherheit der Datenübertragung aus?

Da die in dieser Arbeit untersuchten Fragen keineswegs rein theoretischer Natur sind, werden im Kapitel 6 die Simulationsergebnisse mit Meßergebnissen und Beobachtungen eines real existierenden Transportnetzes verglichen. Die daraus resultierenden, die Simulationen bestätigenden Erkenntnisse bekräftigen den Anspruch der Übertragbarkeit dieser Aussagen auf noch nicht praktizierte Anwendungsfälle.

Das abschließende Kapitel 7 faßt die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und formuliert allgemeingültige und übertragbare Regeln zur Planung und Dimensionierung paketorientierter Übertragungsnetze für den Prozeßdatentransport.

1.1 Prozeßdatenkommunikation in komplexen, geographisch weit verteilten Netzen

Prozeßdatenkommunikation, auch als Fernwirktechnik, Netzleittechnik oder Telematik bezeichnet, stellt sich innerhalb dieses speziellen Anwendungsfalles als Zwitter aus Industrieautomation und Telekommunikation dar. Die klassischen Elemente der Automation, wie Aktoren, Sensoren oder programmierbare Steuerungen charakterisieren den Systemaufbau der, in den meisten Fällen unbemannten, Energieübernahme- bzw. Übergabestationen. Innerhalb dieser Kollokationen sind diese Elemente mittels verschiedenster Bussysteme miteinander verbunden [5]. Die Kommunikationssysteme zur Anbindung dieser unabhängigen Einzelstandorte an ein zentrales übergeordnetes Steuer- und Archivierungssystem wiederum ist, aus Gründen der geographischen Distanzen, der Telekommunikation entlehnt. In Unterscheidung zur Industrieautomation, durch die Echtzeitverarbeitung innerhalb eines Steuerungsknotens charakterisiert, bildet in der Netzleittechnik das gesamte Versorgungsgebiet quasi eine Echtzeitdomäne. Der Fall von gestörten Übertragungsstrecken und die dazugehörige Ersatzwegstrategie ist, anders als bei der industriellen Automation, systemimmanent.

Aus dieser Entwicklung heraus verfügen Energieversorgungsunternehmen in der Regel über ein mehr oder weniger vermaschtes Netz privater Kupferkabel bzw. Lichtwellenleiter entlang der Versorgungstrassen. Die entstandene Topologie ist somit bislang ein Produkt der Versorgungsanforderungen der letzten Jahre. Üblicherweise sind dabei jedwede Kombinationen aus Bus-, Stern- bzw. Ringtopologie ohne Rücksichtnahme auf die Erfordernisse der Übertragungstechnik entstanden. Charakteristisch für regionale Versorgerunternehmen sind sternförmig angeordnete Busstrukturen; für überregional tätige Unternehmen eher eine Kombination aus Ring und Bus. Beide Formen unterscheiden sich wesentlich in den zu überbrückenden Entfernungen.

In Anbetracht der zu transportierenden Medien, insbesondere bei dem betrachteten Beispiel des Gastransportes, ergibt sich die Sicherheit der Übertragung als wesentlichste Priorität. In Abgrenzung zum Transport von elektrischer Energie sind die Echtzeitkriterien weiter gefaßt. Das allgemein beschreibende Merkmal des Datenverkehrs sind äußerst starre und oft zyklisch ablaufende Client-Server-Beziehungen, auch als Aufrufbetrieb.

1.2 Integration verschiedenster Dienste auf eine einheitliche Basis

Bedingt durch den Aufbau privater Weitverkehrsnetze und dem gesellschaftlichen Versorgungsauftrag entstanden Kommunikationssysteme, die völlig autark von staatlichen oder öffentlichen Diensteanbietern sind. Dabei entwickelten sich nach und nach parallele Transportstrukturen, die zwar alle das gleiche physikalische Medium, aber zum Teil völlig unterschiedliche Transporttechniken verwenden.

Zu den wesentlichsten Übertragungsaufgaben zählen neben der schon beschriebenen Netzleittechnik vor allem innerbetriebliche und gesetzlich vorgeschriebene Telefonverbindungen zwischen allen Stationen, Datenverbindungen zu Steuerungen für Konfigurations- und Wartungsarbeiten und Verbindungen zu den im Eichkreis befindlichen Mengenregistriergeräten. Die geeichten Werte der gelieferten Gasmengen sowie deren Qualität müssen meist sowohl an die eigenen Zentralen als auch an die Kunden über wiederum private Netze übertragen werden. Der vormals flächendeckende Betriebsfunk wurde mittlerweile durch Mobiltelefone abgelöst. Für all diese Dienste existiert spezialisiertes Übertragungsequipment parallel nebeneinander, verbunden mit erheblichen Investitions- und Wartungskosten und einer verschwindend geringen Auslastung. Eine einheitliche Ersatzwegstrategie ist ebenfalls nicht gegeben.

Ziel der zu untersuchenden Strukturänderungen mittels des paketorientierten Übertragungsansatzes soll die gemeinsame Nutzung eines allgemeinen Transportnetzes durch möglichst alle teilnehmenden Informationsprozesse sein. Damit kann eine effizientere Nutzung der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität gewährleistet werden. Ein solches Netz fungiert quasi als allgemeiner Dienstleister und bietet standardisierte Schnittstellen zu den einzelnen Anwendungen. Die Sicherung der Übertragungswege übernimmt dann das Übertragungsnetz selbstständig.

1.3 Multicast-Betrieb

Vom Wesen her erfolgt die Datenübertragung in der Fernwirktechnik streng zentristisch. In einer Client-Server-Beziehung werden von den Zentralen Daten aus einer oder allen Unterstationen angefordert, bzw. diese melden spontan Daten an die Zentralinstanzen zurück. Für eine solche Betriebsart eignet sich, abgesehen von der trivialeren Ersatzwegstrategie, auch ein leitungsvermittelter Netz. Im Zuge der Liberalisierung der Energiemärkte entsteht ein bislang vernachlässigbarer Sonderfall, die Durchleitung als reine Transportleistung. Dazu muß eine Fülle von Informationen zusätzlich zu den eigenen Dispatchingzentralen noch an alle weiteren am Transport beteiligten Unternehmen übermittelt werden. Ein solcher Querverkehr stößt in einem leitungsorientierten Netz sehr schnell an seine Grenzen, da in jedem Einzelfall die konkreten Übertragungstrecken und deren Ersatzwege manuell geschaltet werden müssen.

Da in einem paketorientierten Netz alle Teilnehmer über eindeutige, öffentliche Adressen verfügen und diese auch vom Transportequipment ausgewertet werden, ist eine schnelle und flexible Anpassung des Datenverkehrs an geänderte Erfordernisse möglich. Auch diese Multicastverbindungen bedienen sich der netzweiten Ersatzwegstrategie des Transportdienstleisters. Damit ist ein Verkehr von einem beliebigen Punkt im Netz zu beliebig vielen anderen gewährleistet, einzig begrenzt durch die Übertragungskapazität.

2 Strategien und Modelle paketorientierter Prozeßdatennetze

Basis paketorientierter Prozeßdatennetze ist die Segmentierung von Datenströmen in Frames, deren Encapsulation in ein allgemeines Protokoll inklusive Adressierung (Quell- und Zieladresse) und die Übergabe an eine neutrale Transportinstanz. Die Transportinstanz verfügt über ausreichende Informationen des Netzwerkes um den Transport über theoretisch beliebig viele Zwischenstationen zur Zieladresse nach dem Best Effort Prinzip zu gewährleisten. Die Protokollfamilien Ethernet TCP/IP und deren Funktionsmechanismen haben sich als weltweiter Standard etabliert und sind aus folgenden Gründen für einen Einsatz in Prozeßdatennetzen prädestiniert:

- herstellerunabhängiger und weltweit akzeptierter Standard für den Datentransport
- öffentlich zugängliche Protokolldefinitionen
- Hardwareimplementierung auf breitester Basis
- aufgrund des hohen Verbreitungsgrades ist bei Weiterentwicklungen die Kompatibilität gewährleistet
- nahtlose Integration in bestehende EDV-Systeme

Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil dieses Ansatzes stellt das Vorhandensein eines allgemeinen abstrakten Funktionsmodells dar. Dieses von der *International Standards Organization* (ISO) erarbeitete OSI-Referenzmodell (*Open Systems Interconnection*) bietet die Möglichkeit, einzelne Funktionsschichten ohne Veränderungen am Gesamtsystem durch andere technische Implementationen zu ersetzen. Parallel zum OSI-Modell existiert noch ein zweites, das TCP/IP-Referenzmodell. Beide Modelle unterscheiden sich unter anderem dadurch, daß das OSI-Modell vor der Entwicklung der schichtinternen Protokolle erarbeitet wurde und somit mehr allgemeiner Natur ist. Das TCP/IP-Modell ist im Gegensatz dazu eher eine Beschreibung der Funktionen der namensgebenden Protokolle. In der vorliegenden Arbeit soll zur Beschreibung von Netzwerkfunktionen ein modifiziertes OSI-Modell nach Tanenbaum [6, S.62] zum Einsatz kommen.

5	Verarbeitungsschicht / Application Layer
4	Transportschicht / Transport Layer
3	Vermittlungsschicht / Network Layer
2	Sicherungsschicht / Data Link Layer
1	Bitübertragungsschicht / Physical Layer

Bild 2.1: hybrides Referenzmodell dieser Arbeit

Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle der Aspekt, daß sich in einem OSI-konformen Netzwerk jede einzelne Applikation innerhalb der Abstraktionsschichten des für sie am Besten geeigneten Protokolls bedienen kann. Damit erfüllt dieses Design die wesentliche Prämisse der Skalierbarkeit hinsichtlich der Integrationsmöglichkeiten weiterer Applikationen. Unter Beachtung der in dieser Branche üblichen Investitionshorizonte ist auch die spätere Einbindung leistungsfähigerer Hardware gewährleistet.

2.1 Informationsklassen und Statistik der Informationsquellen

Hinsichtlich der einem solchen Gesamtsystem innewohnenden erhöhten Sicherheitsanforderungen ist davon auszugehen, daß derartige Netze auf absehbare Zeit nicht, oder nur in äußerst begrenztem Umfang öffentlichen Zugang erhalten. Diese Maßgabe versetzt den Betreiber in die Lage, den Datenverkehr in wesentlichen Bereichen zu kontrollieren. Trotzdem kann nicht pauschal ausgeschlossen werden, daß es Kopplungen zu öffentlichen bzw. semiöffentlichen Netzen geben wird und auch dieser Vorgabe planerisch entsprochen werden muß. In der vorliegenden Arbeit soll jedoch von einem rein privaten Netzbetrieb ausgegangen werden.

Der ganzheitliche komplexe Informationsgehalt des beschriebenen Netzwerks soll als Synthese gleichartiger monomedialer Informationsklassen betrachtet werden. Nachfolgend werden die bislang schon produktiv eingesetzten Applikationen mit ihren beschreibenden Merkmalen wie Größe, Häufigkeit oder zeitliche Verteilung klassifiziert.

Telematikapplikation

Diese Anwendung stellt den eigentlichen Grund für die Existenz eines derartigen Netzes dar und verdient somit besondere Beachtung. Da es sich im konkreten Fall immer nur um ein Subset variabler Größe aller möglichen Fernwirktelegramme handeln kann, sollen die nachfolgenden Aussagen beispielhaft sein. Im Wesentlichen wird in zwei Kategorien, der Befehlsrichtung und der Melderichtung unterschieden. Diese Kategorien beschreiben die Art der Interaktion zwischen der Zentrale und dem oder der Clients. Ein Fernwirktelegramm in Befehlsrichtung impliziert zusätzlich zu den protokolleigenen Bestätigungen der Transportschichten immer mindestens zwei in der Verarbeitungsschicht angesiedelte Bestätigungen, den Erhalt und die Ausführung. Einen Sonderfall stellt die sogenannte Generalabfrage dar, welche entweder einen selektierten oder alle Clients auffordert, den gesamten Informationsgehalt zu übermitteln. Dieser Fall tritt nur nach Verbindungsabbrüchen oder Änderungen in der Betriebsführung der Zentrale ein. In Melderichtung unterscheidet man zwischen einem Spontanbetrieb, das heißt aufgetretene Schwellwertüberschreitungen werden sofort gesendet, und dem Aufrufbetrieb, bei dem die Clients zyklisch zur Übermittlung bestimmter Werte aufgefordert werden. Grundsätzlich werden alle Fernwirktelegramme aus der