Optimierung des G-WiN

Optimierung in der Planung und beim Aufbau des Gigabit-Wissenschaftsnetzes

Ende Juni diesen Jahres wurde das Gigabit-Wissenschaftsnetz offiziell gestartet. In der zweijährigen Vorbereitungsphase wurden nicht nur die technischen Möglichkeiten der neuen Übertragungstechniken und Dienste getestet. Es wurden auch verschiedene Fragestellungen zum effizienten Einsatz der verfügbaren Ressourcen für den Betrieb des G-WiN untersucht. In diesem Artikel wird beschrieben, wie das G-WiN zu seiner jetzigen Struktur und Topologie gekommen ist.

Andreas Bley
Thorsten Koch

Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin
Abteilung Optimierung
Takustraße 7
D-14195 Berlin

Tel 030-84185-229
030-84185-213
Fax 030-84185-269

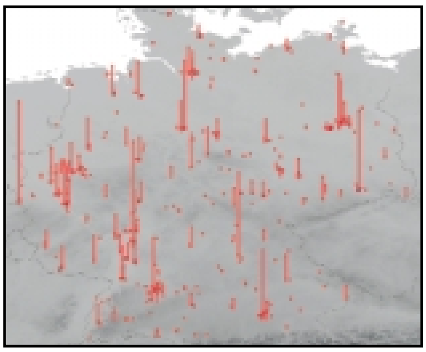
(bley,koch)@zib.de
www.zib.de/projects/telecommunication/GWIN/

Für uns begann die Auseinandersetzung mit dem Gigabit-Wissenschaftsnetz im Juni 1998. Allen Beteiligten war klar, dass die Planung des G-WiN für den DFN-Verein zu einer Herausforderung werden würde.

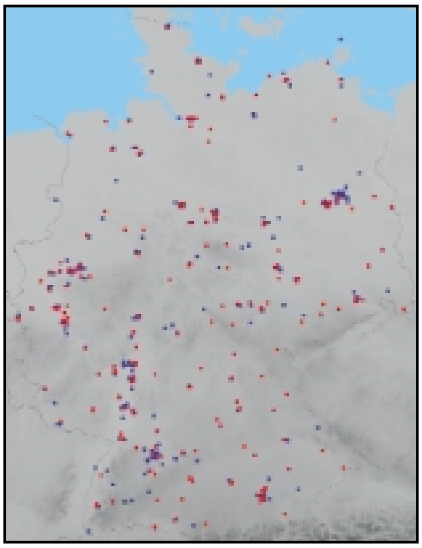
In mehreren Testbeds wurden noch die technischen Konzepte getestet, und die strategischen Planer des DFN-Vereins suchten nach plausiblen Modellen zur Verkehrsprognose. Das G-WiN sollte mehr als 750 Standorte miteinander verbinden und bereits in seiner ersten Ausbaustufe ein Datenvolumen von ca. 220 Terabyte pro Monat bewältigen.

Um ein Netz von dieser Größenordnung entwerfen, ausschreiben und die Angebote realistisch bewerten zu können, mußte der DFN-Verein eine Vorstellung – oder besser noch mathematisch exakte Modelle – davon haben, was ein gutes Netz ist. Außerdem wurde von einem jährlichen Verkehrszuwachs um den Faktor 2,2 ausgegangen, d.h. der monatliche Transfer wächst bis zum Jahr 2004 voraussichtlich um einen Faktor 50 auf ca. 10.000 Terabyte pro Monat. Da es unvertretbar ist, mehrfach größere Änderungen an der Struktur des G-WiN vorzunehmen, mußte dieses Wachstum bereits bei der Planung der ersten Ausbaustufe berücksichtigt werden.

Das führte zu eine Fülle von schwer lösbaren Problemen: Wo werden Kernnetzknoten eingerichtet? Wo wird welcher Standort angebunden? Wieviele Verbindungen braucht man? Welche Kapazität müssen diese Verbindungen haben?



Verkehrsbedarfe der Standorte



Standorte (mögliche Ebene-1/2 Standorte rot)

Clustering

Die erste zu treffende Entscheidung war die Auswahl geeigneter Kernnetzstandorte. Diese Wahl ist von entscheidender Bedeutung für die weitere Planung, weil sie Auswirkungen auf fast alle nachfolgenden Planungsschritte hat.

Von Seiten des DFN gab es folgende Vorgaben: Das Netz sollte aus drei Ebenen bestehen. Die erste Ebene des Kernnetzes wird von 10 Standorten gebildet, die untereinander ausfallsicher verbunden sein sollen. Jedem Ebene-Eins Standort werden zwei Standorte der Ebene Zwei zugeordnet. In Ebene Drei sind alle übrigen Standorte jeweils den ihnen am nächsten liegenden Ebene-Eins oder Ebene-Zwei Standorten zugeordnet.

Weiterhin wurde festgelegt, welche der Standorte von den technischen und politischen Gegebenheiten her als Ebene-Eins oder Ebene-Zwei Standorte in Frage kommen. Das waren 261 der 759 Standorte. Daraus wurden nun mit Hilfe mathematischer Modelle die 30 Ebene-Eins und -Zwei Standorte so ausgewählt, dass alle Standorte in der Gesamtheit günstig angebunden werden konnten. Aus der Lösung des Clustering-Problems wurde

Gegeben eine Standortmenge V und eine Menge von möglichen Ebene-Eins Standorten Z. Zu jedem $p \in Z$ sei K_p die Menge der möglichen Konfigurationen. Eine Konfiguration stellt einen bestimmten Ausbauzustand eines Standortes da. Im folgenden seien $i, p \in Z$, also Standorte.

w_{ip}	Anbindungskosten von i nach p.
d_i	Verkehrsbedarf an Standort i.
c_p^k	Kapazität von p in Konfiguration k.
w_p^k	Kosten für p in Konfiguration k.
x_{ip}	= 1, wenn i an p angeschlossen ist.
z_p^k	= 1, wenn Konfiguration k an Standort p verwendet wird.

Zielfunktion

$$\min \sum_p \sum_i w_{ip} x_{ip} + \sum_p \sum_k w_p^k z_p^k$$

Nebenbedingungen

Jeder Standort i muß an genau einen Ebene-Eins Standort p angeschlossen werden:

$$\sum_p x_{ip} = 1 \quad \text{für alle } i$$

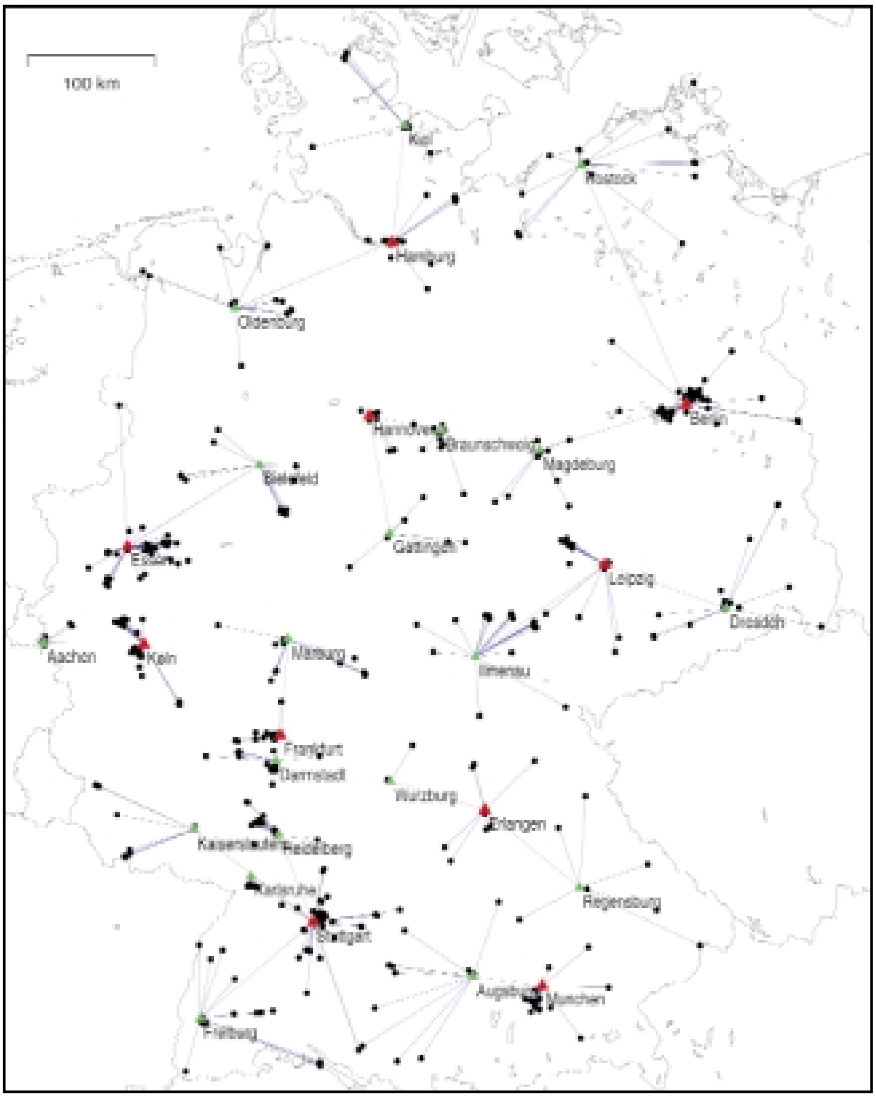
Die Kapazität von Ebene-Eins Standort p muß größer/gleich dem Bedarf der an ihm angeschlossenen Knoten sein:

$$\sum_i d_i x_{ip} \leq \sum_k c_p^k z_p^k \quad \text{für alle } p$$

Jeder Ebene-Eins Standort p hat genau eine aktive Konfiguration:

$$\sum_k z_p^k = 1 \quad \text{für alle } p$$

Mathematisches Modell des Clustering-Problems



Lösung des Clustering-Problems

anschließend die aggregierte Verkehrsbedarfsmatrix zwischen den 10 Ebene-Eins Standorten berechnet.

Kernnetzdimensionierung

Die Frage, die sich nun stellte, war: Wie verbinden wir die 10 Ebene-Eins Standorte möglichst effizient untereinander, so dass die Kapazitäten ausreichen, um den Verkehr zwischen allen Standorten abzuwickeln. Dabei sind im wesentlichen drei Dinge zu entscheiden:

- Welche Topologie soll das Ebene-Eins-Netz haben,
- Welche Kapazitäten werden auf welchen Kanten installiert, und
- Auf welchen Wegen werden die Daten letztlich übertragen?

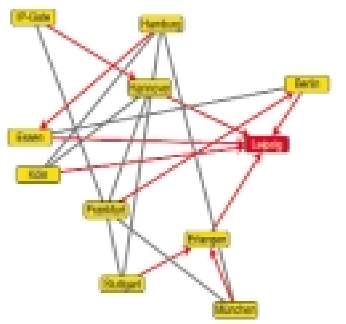
Diese Fragen sind so eng miteinander verknüpft, dass sie nur gemeinsam entschieden werden können. Daher war ein integriertes mathematisches Modell nötig, das alle drei Fragestellungen gemeinsam abbildet. Neben verschiedenen technischen Forderungen, sind vor allem zwei Aspekte von zentraler Bedeutung (und mit mathematischen Schwierigkeiten verbunden) gewesen: die gewünschte Ausfallsicherheit des Netzes und die Verwendung des OSPF-Routing Protokolls.

Ausfallsicherheit im Ebene-Eins-Netz bedeutet, dass selbst bei Ausfall einer einzelnen Verbindung oder eines einzelnen Knotens alle übrigen Knoten immer noch mit einer festgelegten Mindestbandbreite kommunizieren können. Ein solches Netz wird auch als zweifach zusammenhängend bezeichnet:
Es müssen mindestens zwei Komponenten gleichzeitig ausfallen, damit das Netz nicht mehr zusammenhängend ist.

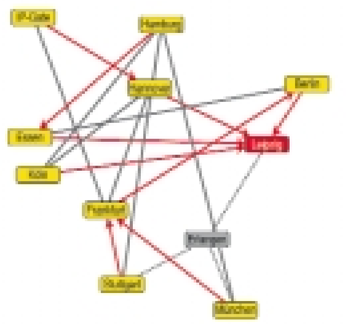
Die größte Herausforderung für die Optimierung war jedoch das beim IP-Verkehr verwendete OSPF-Routing-Protokoll. Im Betrieb des Netzes ist dieses Protokoll einfach: Aus vorgegebenen Längenwerten für die Kanten werden lediglich kürzeste Wege für das Routing berechnet.

Bei der Netzplanung dagegen sollen diese Längenwerte erst bestimmt werden, es ist also das umgekehrte Problem zu lösen. Ziel ist es, solche Längenwerte zu finden, dass sich aus den daraus festgelegten Routingwegen und Kantenkapazitäten ein kostenoptimales Netz ergibt. Aus mathematischer und algorith-

Beim OSPF-Routing (**O**pen **S**hortest **P**ath **F**irst) wird jedem Link ein Längenwert zugeordnet. Jedes Datenpaket wird dann auf einem bezüglich dieser Längen kürzesten Weg zu seinem Ziel geroutet.



Die Routingwege nach Leipzig bilden einen umgekehrten Wurzelbaum.



Bei Ausfall des Knotens Erlangen werden für die betroffenen Verbindungen neue kürzeste Wege bestimmt. Vom Ausfall nicht betroffene Routingwege bleiben gleich.

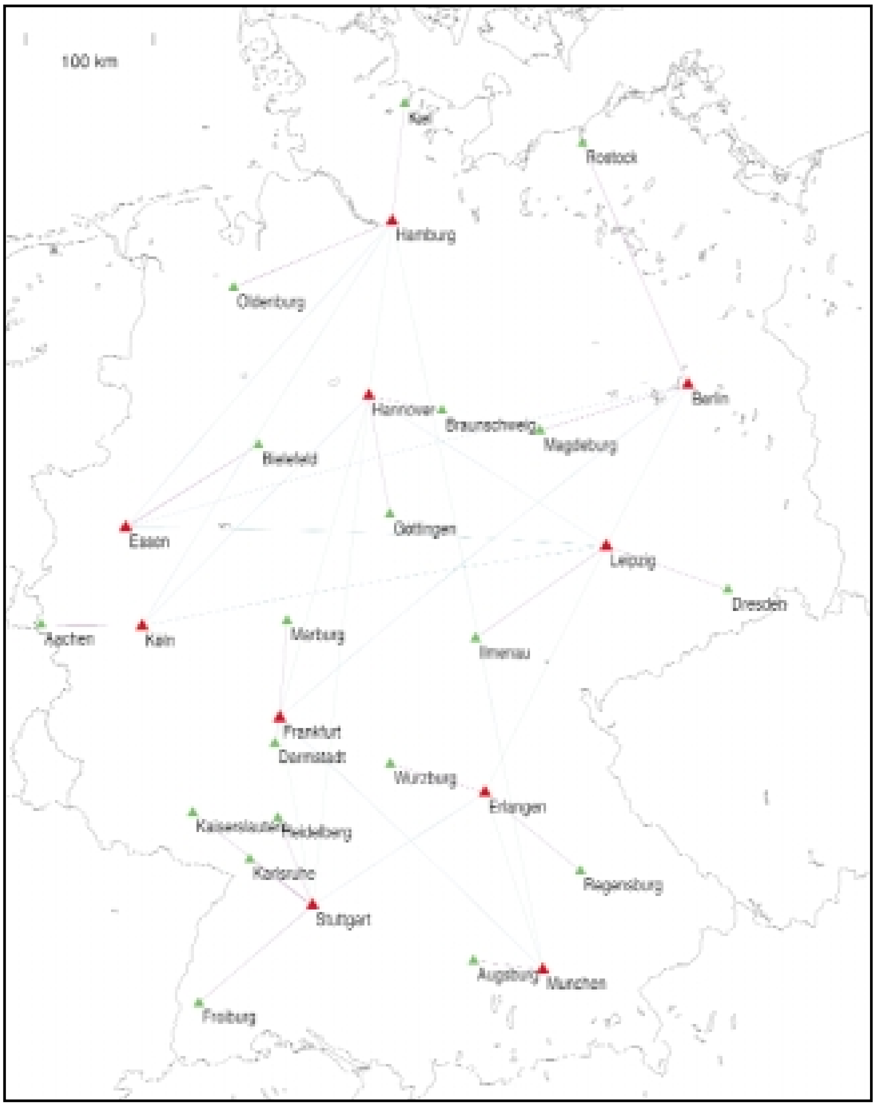
OSPF-Routing

Damit die verwendeten Routingwege überhaupt kürzeste Wege sein können, müssen sie einige einfache Monotoniebeziehung erfüllen: Verläuft der Routingweg von a nach c über die Kante ab, so sind sein Reststück zwischen b und c und der Routingweg zwischen b und c identisch. Sind alle diese Beziehung erfüllt, kann mit dem folgenden linearen Ungleichungssystem festgestellt werden, ob diese Wege tatsächlich ein System eindeutiger kürzester Wege sind:

$$\begin{aligned}
d_{s,u} + l_{uv} - d_{s,v} &= 0 \quad \forall s, uv, \text{ falls } uv \text{ auf Routingweg } s \to v \\
d_{s,u} + l_{uv} - d_{s,v} &\geq 1 \quad \forall s, uv, \text{ falls } uv \text{ nicht auf Routingweg } s \to v \\
l_{uv} &\geq 1 \quad \forall uv, \text{ Variable für Längenwert von } uv \\
d_{s,t} &\geq 0 \quad \forall s,t, \text{ Variable für Abstand } s \to t
\end{aligned}$$

Hat dieses System eine Lösung, so sind die kürzesten Wege bezüglich der Längenwerte l_{uv} genau die gegebenen Routingwege. Andernfalls lassen sich die gegebenen Wege nicht als System kürzester Wege darstellen. Das lineare Ungleichungssystem liefert uns dann aber gleich eine Bedingung, die alle Systeme kürzester Wege erfüllen müssen, die aber von den gegebenen Wegen verletzt wird.

Lineares Programm zur Berechnung der Routinggewichte



Das Ergebnis der beiden Optimierungsschritte: Das Ebene-Eins und -Zwei Netz für die erste Ausbaustufe des G-WiN.

mischer Sicht ist dieses Problem extrem schwierig.

Doch auch dieses kombinierte Netzdimensionierungs-Routing-Problem ließ sich als mathematisches Optimierungsproblem formulieren und mit speziell für dieses Problem entwickelten Algorithmen lösen.

Betriebsoptimierung

Da sich im Laufe der Zeit sowohl der Verkehrsbedarf zwischen den Standorten als auch die zur Verfügung stehenden Kapazitäten ändern, werden wir für die Planung der nächsten Ausbaustufen des G-WiN diese Berechnungen wiederholen. So wird auch weiterhin eine optimale Konfiguration des Netzes gewährleistet.•