

# Mögliche neue Strukturen im Ortsnetz und ihre minimale Länge

von Rudolf Nocker\*

Mitteilungen aus den Forschungslaboratorien der Siemens AG

Auch für das Teilnehmeranschlußnetz werden neben dem heute üblichen „Sternnetz“ neuerdings „Ring-“ und „Verzweigungsnetze“ genannt, und es wird die Frage diskutiert, ob damit geringere Kosten zu erwarten sind. Mit Begriffen der Graphentheorie werden hier z. B. die Strukturen Stern, Ring, Baum definiert. Ein gedachtes Ortsnetz wird dann in quadratische Bereiche mit der Seitenlänge  $l$  und mit  $M$  Teilnehmern aufgeteilt. Für verschiedene Strukturen des Leiternetzes in der Teilnehmerebene werden die Mindestlängen der Leiter und der Kabelkanäle berechnet. Unter anderem zeigt sich, daß unabhängig von der Struktur des Leiternetzes die Kabelkanäle, ein dominierender Kostenanteil in der Teilnehmerebene, praktisch gleich lang sind, nämlich  $l/M^{0,5}$  je Teilnehmer.

## Possible New Local Network Configurations and their Minimum Length

Besides the conventional star network configuration used for subscriber distribution networks, ring and branched configurations are at present also under consideration from the aspect of cost reduction. Star, ring and tree configurations are, for instance, being defined in terms of graph theory. An imagined local network is subdivided into squares with a side length  $l$  and  $M$  subscribers and the minimum lengths of the cables and cable ducts calculated for various network configurations. It is found among other things that, irrespective of the chosen configuration, the cable ducts, which represent a predominant percentage of the cost in the subscriber network level, are of practically equal length, viz.  $l/M^{0,5}$  per subscriber.

### 1. Einleitung

Ein Nachrichtennetz besteht aus Teilnehmereinrichtungen, Vermittlungseinrichtungen und Nach-

richtenwegen und ist im allgemeinen hierarchisch in mehreren Netzebenen aufgebaut. Bei leitergebundener Übertragungstechnik kann jede Netzebene unter anderem nach der Struktur ihres Leiternetzes klassifiziert werden. Neben den heute üblichen „Stern-“ und „Maschennetzen“ gibt es neuerdings auch Vorschläge für „Ring-“ und „Verzweigungsnetze“. Da-

\* Dipl.-Ing. R. Nocker, i.H. Siemens AG, Forschungslaboratorien, Hofmannstraße 51, D-8000 München 70.

her sollen verschiedene Strukturen anhand einiger Kriterien verglichen werden.

Dazu wird ein gedachtes Ortsnetz mit leitergebundener Übertragungstechnik und mindestens zwei Netzebenen betrachtet, das völlig neu eingerichtet wird. Der Bereich des Ortes sei in Konzentration-Anschlußbereiche aufgeteilt. Wegen der in Städten angenähert orthogonalen Straßenführung seien diese Bereiche quadratisch, und die Führung von Nachrichtenleitern und Kabelkanälen sei nur parallel zu den Seiten des Quadrats möglich. In einem solchen Quadrat der Teilnehmerebene mit der Seitenlänge  $l$  seien  $M$  Teilnehmer gleichmäßig angeordnet. Zur Vereinfachung der Berechnung wird  $M = m^2$  mit ganzzahligem  $m$  vorausgesetzt (Bild 1).

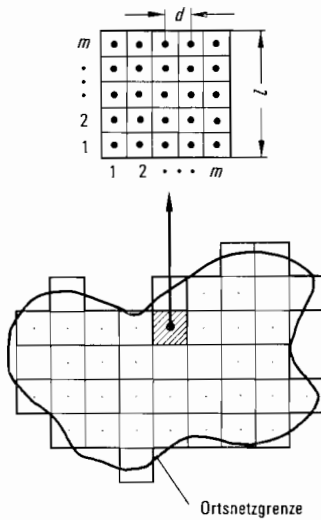


Bild 1. Modell für die Aufteilung eines Ortes in Anschlußbereiche und die Anordnung von  $M = m^2$  Teilnehmern innerhalb eines Anschlußbereiches.

Unter Verwendung von Begriffen und Aussagen der Graphentheorie werden zunächst Graphen klassifiziert und dann Graphen vorgegebener Struktur und minimaler Länge berechnet. Hierfür ergeben sich für die verschiedenen hier betrachteten Strukturen relativ einfache Ergebnisse, mit denen der Aufwand für die Nachrichtenleiter und die Kabelkanäle bei verschiedenen Leiternetzstrukturen in der Teilnehmerebene abgeschätzt werden kann.

## 2. Definitionen

Ein *abstrakter Graph* besteht aus einer nichtleeren Menge von Elementen — genannt *Knoten*  $n_\alpha$  ( $\alpha = 1, 2, \dots, v$ ) — und einer Menge ungeordneter Paare verschiedener Knoten — genannt *Kanten*  $[n_\alpha, n_\beta]$ .

Einen *geometrischen Graph* erhält man, wenn man jeden Knoten  $n_\alpha$  als Punkt im Raum und jede Kante  $[n_\alpha, n_\beta]$  als ungerichtete Verbindung zwischen den beiden Knoten  $n_\alpha$  und  $n_\beta$  darstellt (Bild 2).

Die obige Definition umfaßt — in der Bezeichnung nach [1], [2] — nur ungerichtete Graphen ohne Schlingen und ohne parallele Kanten, sog. einfache Graphen. Im Zusammenhang mit Nachrichten-

netzen werden nur solche Graphen benötigt, nachfolgend ist daher nur von solchen die Rede.

Die Kante  $[n_\alpha, n_\beta]$  heißt *inzident* mit den beiden Knoten  $n_\alpha$  und  $n_\beta$  und umgekehrt. Diese beiden Knoten werden als *benachbarte Knoten* bezeichnet. Man sagt auch, diese beiden Knoten seien durch die Kante miteinander verbunden. Als *Grad* eines Knotens bezeichnet man die Anzahl der zu diesem Knoten inzidenten Kanten. Eine Folge  $(n_\alpha, n_\beta, n_\gamma, \dots, n_\lambda, n_\mu, n_\nu)$  von Knoten, bei der zwei aufeinanderfolgende Knoten jeweils benachbart sind und jeder Knoten höchstens einmal vorkommt, ist ein *Weg* zwischen dem Anfangsknoten  $n_\alpha$  und dem Endknoten  $n_\nu$ . Eine *Masche* ist ein Weg, bei dem der Anfangsknoten gleich dem Endknoten ist. Ein Graph ist *zusammenhängend*, wenn es zwischen jedem Paar von Knoten mindestens einen Weg gibt. Ein *Baum* ist ein zusammenhängender Graph ohne Maschen. Die Kanten eines Baumes werden auch als *Zweige* bezeichnet. Ist jeder Kante (oder/und jedem Knoten) eines Graphen eine Zahl — genannt *Gewicht* — zugeordnet, so spricht man von einem *gewichteten Graphen*.

Im Abschnitt 5 wird jeder Kante die Länge der entsprechenden Verbindung des geometrischen Graphen zugeordnet und als *Länge der Kante* bezeichnet. Die Summe der Länge aller Kanten wird als *Gesamtlänge* des Graphen bezeichnet.

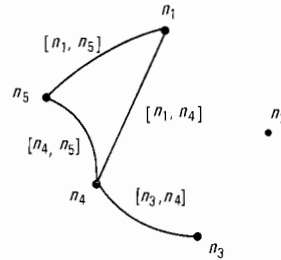


Bild 2. Beispiel eines geometrischen Graphen (ungerichtet, ohne Schlingen, ohne parallele Kanten).

Bild 2 zeigt ein Beispiel eines geometrischen Graphen mit 5 Knoten und 4 Kanten. Beispielsweise ist die Kante  $[n_1, n_5]$  inzident mit den beiden Knoten  $n_1$  und  $n_5$  und umgekehrt, hat der Knoten  $n_5$  den Grad 2, ist  $(n_4, n_5, n_1)$  ein Weg zwischen  $n_4$  und  $n_1$  und ist  $(n_4, n_5, n_1, n_4)$  eine Masche. Der Graph ist nicht zusammenhängend, weil vom Knoten  $n_2$  kein Weg zu einem anderen Knoten existiert.

## 3. Klassifizierung zusammenhängender Graphen

Mit den im Abschnitt 2 angegebenen Begriffen können zusammenhängende Graphen folgendermaßen klassifiziert werden (Bild 3): Je nachdem, ob ein zusammenhängender Graph Maschen enthält oder nicht, erfolgt eine Einteilung in zwei Klassen, nämlich in vermaschte Graphen und Bäume.

Ein *Baum* hat genau  $e = v - 1$  Kanten, ein *vermaschter Graph* mindestens  $v$  Kanten. Zwei Sonderfälle von vermaschten Graphen sind der Ring und der vollvermaschte Graph, der auch als vollständiger Graph bezeichnet wird. Im *Ring* hat jeder

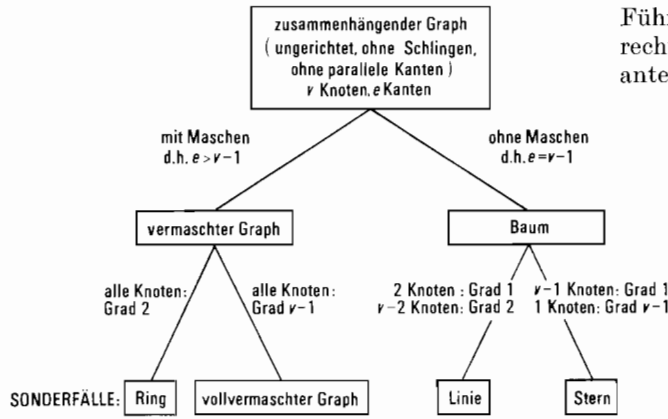


Bild 3. Klassifizierung zusammenhängender Graphen.

Führung parallel zu den Seiten des Quadrats berechnet. Division durch  $M = m^2$  ergibt die sog. anteilige Netzlänge  $l_A = l_{ges}/m^2$ .

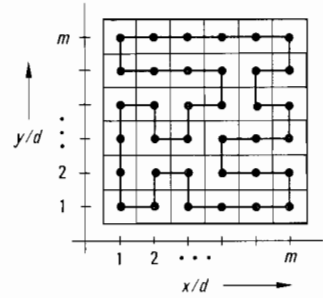


Bild 4. Ein kürzester Ring.

Knoten den Grad 2; ferner gilt  $e = v$ . Im *vollvermaschten Graphen* hat jeder Knoten den Grad  $v - 1$ . Die Anzahl der Kanten ist hier  $e = v \cdot (v - 1)/2$ . Zwei Sonderfälle von Bäumen sind die Linie und der Stern. Bei einer *Linie* haben  $(v - 2)$  Knoten den Grad 2 und 2 Knoten den Grad 1. Beim *Stern* haben  $v - 1$  Knoten den Grad 1 und 1 Knoten den Grad  $v - 1$ .

4. Struktur von Leiternetz und Kabelkanalnetz

Die Verkehrspunkte einer Netzebene sind die Quellen und/oder Senken des Nachrichtenverkehrs der betrachteten Netzebene. Stellt man die räumlich konzentrierten Einrichtungen — das sind die Verkehrspunkte und eine eventuell vorhandene zentrale Vermittlungsstelle — als Punkt und einen oder mehrere Nachrichtenleiter zwischen zwei Einrichtungen als eine einzige ungerichtete Verbindung zwischen den entsprechenden Punkten dar, so erhält man einen ungerichteten, zusammenhängenden geometrischen Graphen. Dieser Graph ist ein Modell des real vorliegenden Leiternetzes und zeigt, wie die Verkehrspunkte der betrachteten Ebene untereinander bzw. mit einer zentralen Einrichtung durch Nachrichtenleiter verbunden sind. Seine Benennung entsprechend der Klassifizierung aus Abschnitt 3 bezeichnet man als Leiternetzstruktur. Man spricht also von vermaschtem Leiternetz, Ringleiternetz, vollvermaschtem Leiternetz, Baumleiternetz usw. Ein vollvermaschtes Leiternetz wird in der Nachrichtentechnik oft als „Maschennetz“ bezeichnet.

Die Verlegung der Nachrichtenleiter geschieht in Kabelkanälen. Stellt man jedes Zusammentreffen von Kabelkanälen als Punkt und die Kabelkanäle als Verbindung zwischen den entsprechenden Punkten dar, so erhält man wieder einen ungerichteten zusammenhängenden Graphen. Dessen Bezeichnung ist die Struktur des Kabelkanalnetzes.

5. Berechnung kürzester Graphen

Für die im Bild 1 angegebene Anordnung von Punkten wird nun ein Ring, ein vollvermaschter Graph, ein Baum, eine Linie und ein Stern mit jeweils *minimaler* Gesamtlänge  $l_{ges}$  bei orthogonaler

5.1. Kürzester Ring

Bei  $m^2$  Knoten hat ein Ring genau  $m^2$  Kanten. Nach Bild 1 ist die minimale Länge einer Kante  $d = l/m$ . Hat ein Ring *nur* Kanten dieser Länge  $d$ , so hat er minimale Länge. Bei geradem  $m$  kann man viele verschiedene solcher Ringe bilden, Bild 4 zeigt einen. Bei ungeradem  $m$  ist bei orthogonaler Führung mindestens eine Kante der Länge  $2d$  erforderlich. Für die anteilige Netzlänge  $l_A$  — normiert auf  $d$  — gilt für den kürzesten Ring deshalb

$$l_A/d = \begin{cases} 1 & \text{für gerade } m \\ (m^2 + 1)/m^2 & \text{für ungerade } m. \end{cases} \quad (1)$$

Für  $m \geq 5$  gilt also mit guter Näherung stets  $l_A \approx d$ .

5.2. Kürzester vollvermaschter Graph (zum Vergleich)

Nur zum theoretischen Vergleich soll auch die anteilige Netzlänge beim kürzesten vollvermaschten Graphen berechnet werden. Zwischen zwei Punkten mit den Koordinaten  $(x_1, y_1)$  und  $(x_2, y_2)$  — Bild 4 — ist bei orthogonaler Führung die minimale Länge einer Verbindung genau  $abs(x_1 - x_2) + abs(y_1 - y_2)$ , mit  $abs(x)$  Absolutwert von  $x$ . Die Summe  $l_{ij}$  der Längen aller Kanten vom Knoten mit den Koordinaten  $(i, j)$  zu allen übrigen Knoten mit den Koordinaten  $(s, t)$  ( $s = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, m$ ) ist also

$$l_{ij} = d \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^m [abs(i - s) + abs(j - t)]. \quad (2)$$

Bei Summation über alle möglichen  $i$  bzw.  $j$  wird die Länge jeder Kante zweimal berücksichtigt, deshalb ist

$$l_{ges}/d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m l_{ij}. \quad (3)$$

Unter Verwendung der Beziehungen (z. B. [4])

$$\sum_{i=1}^P i = \frac{P(P + 1)}{2}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^P i^2 = \frac{P(P + 1)(2P + 1)}{6} \quad (5)$$

ergibt sich nach Umformung schließlich als Ergeb-

nis für die anteilige Netzlänge  $l_A = l_{ges}/m^2$  exakt

$$l_A/d = m \cdot (m^2 - 1)/3. \quad (6)$$

Für  $m \geq 5$  gilt also mit guter Näherung  $l_A/d \approx 0,33 m^3$ . Bei *geradliniger* Verbindung der Knoten ergibt die numerische Berechnung für  $m \geq 5$  etwa  $l_A/d \approx 0,26 m^3$ .

### 5.3. Kürzester Baum, kürzeste Linie

Bei  $m^2$  Knoten hat — wie gesagt — ein Baum genau  $m^2 - 1$  Zweige. Nach Bild 1 ist  $d$  die minimal mögliche Länge eines Zweiges. Hat ein Baum nur Zweige der Länge  $d$ , so hat er minimale Länge. Dies ist hier immer möglich. Bild 5 zeigt einen solchen

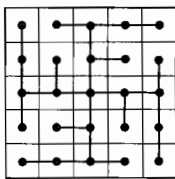


Bild 5. Ein kürzester Baum.

kürzesten Baum. Die anteilige Netzlänge  $l_A$  ist somit beim kürzesten Baum

$$l_A/d = (m^2 - 1)/m^2. \quad (7)$$

Für  $m \geq 5$  gilt also mit guter Näherung  $l_A/d \approx 1$ .

Bei der Anordnung nach Bild 1 ergibt sich für die Linie dieselbe Aussage wie für den Baum.

### 5.4. Kürzester Stern

Sind  $m^2$  Punkte geradlinig mit einem „Sternpunkt“ zu verbinden, ergibt sich der kürzeste Stern bekanntlich dann, wenn die zentrale Einrichtung in den Schwerpunkt der  $m^2$  Punkte gelegt wird. Dies gilt bei der Anordnung der Punkte nach Bild 1 auch dann, wenn nur kürzeste orthogonale Verbindungen erlaubt sind, vgl. Anhang. Weil solche Verbindungen auf vielfältige Weise möglich sind, gibt es viele kürzeste Sterne. Im Bild 6 ist für gerade und ungerade  $m$  ein Viertel eines solchen kürzesten Sterns dargestellt. Die Berechnung der anteiligen Netzlänge eines kürzesten Sterns ist im Anhang skizziert. Es ergibt sich

$$\frac{l_A}{d} = \begin{cases} \frac{m^2 - 1}{m^2} \cdot \frac{m}{2} & m \text{ ungerade} \\ \frac{m}{2} & m \text{ gerade} \end{cases} \quad (8)$$

Für  $m \geq 5$  gilt also mit guter Näherung für die kürzeste anteilige Netzlänge stets

$$l_A \approx 0,50 m d = 0,50 l. \quad (9)$$

Die numerische Berechnung der minimalen anteiligen Netzlänge bei *geradliniger* Verbindung ergibt für  $m \geq 5$

$$l_A \approx 0,38 m d = 0,38 l. \quad (10)$$

Die orthogonale Führung ergibt also eine Erhöhung der anteiligen Netzlänge um rund 30%.

## 6. Anteilige Leiterlänge, anteilige Kabelkanallänge

Mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5 kann für verschiedene Leiternetzstrukturen in der Teilnehmerebene der Mindestaufwand an Nachrichtenleitern und Kabelkanälen bestimmt werden.

Die anteilige Leiterlänge je Teilnehmer bei einer bestimmten Leiternetzstruktur ist das Produkt aus anteiliger Netzlänge  $l_A$  und der Anzahl der im Raumvielfach verlegten Nachrichtenleiter.

Die anteilige *Kabelkanallänge* je Teilnehmer ist beim kürzesten Ring- und Baumleiternetz gleich der anteiligen Netzlänge des jeweiligen Leiternetzes (Bilder 4 und 5) und damit in beiden Fällen fast gleich. Beim kürzesten Sternleiternetz kann man bei der Anordnung der Teilnehmer nach Bild 1 die Nachrichtenleiter stets so verlegen, daß die zugehörigen Kabelkanäle einen kürzesten Baum bilden. Beispielsweise ist das Kabelkanalnetz für das Sternleiternetz nach Bild 6 der Baum nach Bild 5. Für ein kürzestes Leiternetz der Struktur Ring, Baum, Linie und Stern ist also die anteilige Kabelkanallänge  $l_{KA}$  je Teilnehmer stets gleich, nämlich  $l_{KA} \approx d$ .

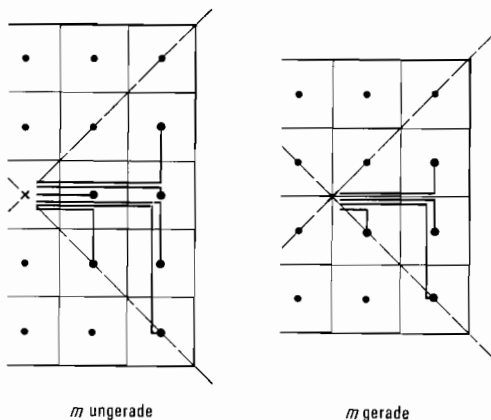


Bild 6. Ein Viertel eines kürzesten Sterns.

Der Vollständigkeit halber sei vermerkt, daß sich beim kürzesten vollvermaschten Leiternetz für die anteilige Kabelkanallänge je Teilnehmer  $l_{KA} = 2d \cdot (m - 1)/m \approx 2d$  ergäbe.

## 7. Schlußbemerkung

Im vorliegenden Beitrag wurden zunächst Strukturen klassifiziert, dann wurden für verschiedene Leiternetzstrukturen in der Teilnehmerebene eines gedachten Ortsnetzes mit gleichmäßiger Teilnehmerverteilung die Mindestlängen der Nachrichtenleiter und Kabelkanäle berechnet. Die angegebenen Beziehungen können beispielsweise zur Abschätzung von Mindestkosten verwendet werden. Die Gesamtkosten je Teilnehmer ergeben sich aus den Kosten für die Teilnehmereinrichtung sowie den anteiligen Kosten für die zentralen Einrichtungen, für die Nachrichtenleiter und die Kabelkanäle. In der Teilnehmerebene bilden die beim Kabelkanalbau erforderlichen Erdarbeiten einen dominierenden Kostenanteil. Dieser Kostenanteil ist unabhängig von

der Leiternetzstruktur Stern, Ring, Baum, Linie stets gleich groß, er kann also durch neuartige Leiternetzstrukturen nicht vermindert werden. Neben den Kosten eines Nachrichtennetzes sind von maßgebender Bedeutung dessen betriebliche Eigenschaften, z.B. bezüglich des Zu- und Abschaltens von Teilnehmern, der Geheimhaltung von Nachrichten und der Auswirkung von Störungen. Einige der hier angeführten Ergebnisse sind in [5] übernommen worden.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein beim Autor.

(Eingegangen am 15. April 1976.)

**Anhang: Berechnung eines kürzesten Sterns bei orthogonaler Führung**

In einem orthogonalen Koordinatensystem werden die Koordinaten von  $M$  beliebig angeordneten Punkten mit  $x_i$  und  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ), die Koordinaten des (vorerst beliebig angeordneten) Sternpunktes mit  $x_0$  und  $y_0$  bezeichnet. Die kürzeste orthogonale (parallel zu den Koordinatenachsen) Verbindung vom Punkt  $i$  zum Sternpunkt hat die Länge  $\text{abs}(x_0 - x_i) + \text{abs}(y_0 - y_i)$ . Die Gesamtlänge ergibt sich also zu

$$\begin{aligned}
 l_{\text{ges}}(x_0, y_0) &= \sum_{i=1}^M [\text{abs}(x_0 - x_i) + \text{abs}(y_0 - y_i)] = \\
 &= \sum_{i=1}^M \text{abs}(x_0 - x_i) + \sum_{i=1}^M \text{abs}(y_0 - y_i) = \\
 &= a(x_0) + b(y_0). \tag{11}
 \end{aligned}$$

Der Minimalwert dieses Ausdrucks ergibt sich dann, wenn sowohl  $a(x_0)$  als auch  $b(y_0)$  ihren Minimalwert annehmen. Zunächst wird die Funktion  $a(x_0)$  betrachtet. Wegen

$$\text{abs}(x_0 - x_i) = \begin{cases} (x_0 - x_i) & \text{für } x_0 \geq x_i \\ -(x_0 - x_i) & \text{für } x_0 < x_i \end{cases} \tag{12}$$

ist  $a(x_0)$  eine stetige, stückweise lineare Funktion. Unter den  $M$  Koordinaten  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) seien  $L$  verschiedene Koordinaten  $z_1 < z_2 < \dots < z_r \dots < z_L$  und  $v_r$  sei die Vielfachheit der Koordinate  $z_r$  unter den Koordinaten  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ). Dann ist

$$\sum_{r=1}^L v_r = M. \tag{13}$$

Die Ableitung  $a'(x_0)$  ist in  $z_r$  ( $r = 1, 2, \dots, L$ ) nicht definiert und weist dort wegen

$$\text{abs}'(x_0 - z_r) = \begin{cases} 1 & \text{für } x_0 > z_r \\ -1 & \text{für } x_0 < z_r \end{cases} \tag{14}$$

Sprungstellen der Höhe  $+2v_r$  auf. Somit ist

$$a'(x_0) = \begin{cases} -M & \text{für } x_0 < z_1 \\ -M + 2 \sum_{r=1}^s v_r & \text{für } z_s < x_0 < z_{s+1}, \\ & s = 1, 2, \dots, L-1 \\ +M & \text{für } z_L < x_0. \end{cases} \tag{15}$$

Je nach Anzahl  $L$  und Vielfachheit  $v_r$  der Koordinaten  $z_r$  kann es somit entweder ein Intervall oder genau einen Punkt geben, in dem  $a(x_0)$  sein Minimum annimmt. Im ersten Fall ist dies das Intervall, in dem  $a'(x_0) = 0$  ist, im zweiten Fall diejenige Koordinate, bei der  $a'(x_0)$  von negativen auf positive Werte springt. Dieselbe Überlegung gilt natürlich für  $b(y_0)$ .

Somit ergibt sich bei einer Anordnung von  $M = m^2$  Punkten nach Bild 1 für die optimale Lage des Sternpunktes bei ungeradem  $m$  der Schwerpunkt der  $m^2$  Punkte und bei geradem  $m$  der im Bild 7 schraffierte Bereich, welcher den Schwerpunkt enthält.

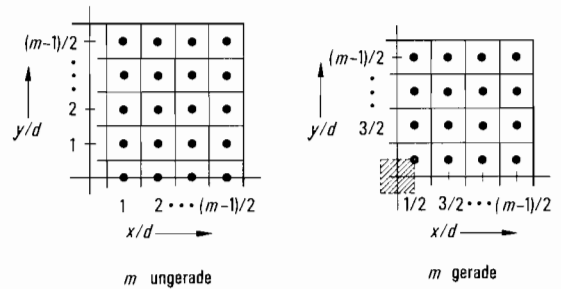


Bild 7. Zur Berechnung eines kürzesten Sterns.

Bei ungeradem  $m$  hat eine kürzeste orthogonale Verbindung eines Punkts mit den Koordinaten  $x = id$  und  $y = jd$  mit dem Schwerpunkt die Länge  $(i + j)d$ . Da im Bild 7 nur ein Viertel des Bereiches angegeben ist, ergibt sich die Gesamtlänge  $l_{\text{ges}}$  zu

$$l_{\text{ges}} = 4d \sum_{i=0}^{(m-1)/2} \sum_{j=1}^{(m-1)/2} (i + j), \quad m \text{ ungerade.} \tag{16}$$

Bei geradem  $m$  kann der Sternpunkt beliebig in den schraffierten Bereich von Bild 7 gelegt werden. Für die Berechnung wurde der Schwerpunkt gewählt. Dann hat der Punkt mit den Koordinaten  $x = (0,5 + i)d$  und  $y = (0,5 + j)d$  zu diesem Sternpunkt den Abstand  $(0,5 + i + 0,5 + j)d$ . Also ist die Gesamtlänge

$$l_{\text{ges}} = 4d \sum_{i=0}^{(m-2)/2} \sum_{j=0}^{(m-2)/2} (1 + i + j), \quad m \text{ gerade.} \tag{17}$$

Unter Verwendung von Gl. (4) ergibt sich durch Auswertung von Gl. (16), (17) schließlich Gl. (8).

**Schrifttum**

[1] Busacker, R. G. und Saaty, T. L., Endliche Graphen und Netzwerke. R. Oldenbourg Verlag, München 1968.  
 [2] Wilkov, R. S., Analysis and design of reliable computer networks. Transact. Inst. Elect. Electron. Engrs. COM-20 [1972], 660-678.  
 [3] NTG 0902 Vermittlungstechnik, Entwurf 1972. Nachrichtentech. Z. 25 [1972], K 125-K 136.  
 [4] Bronstein, I. N. und Semendjajew, K. A., Taschenbuch der Mathematik; 7. Aufl. Verlag H. Deutsch, Frankfurt am Main 1967.  
 [5] Kommission für den Ausbau des technischen Kommunikationssystems, Anlageband 6: Breitbandkommunikation. Verlag Dr. H. Heger, Bonn-Bad Godesberg 1976.