Einführung in die Informatik: Systeme und Anwendungen

Teil: Rechnernetze

Prof. Dr. Stefan Conrad

Ludwig-Maximilians–Universität München
Institut für Informatik
Lehr- und Forschungseinheit für Datenbanksysteme
Oettingenstraße 67, D-80538 München

conrad@dbs.informatik.uni-muenchen.de

Universität München
Sommersemester 2001

— *Folienskriptum* —

Stefan Conrad

1. Grundlagen von Rechnernetzen

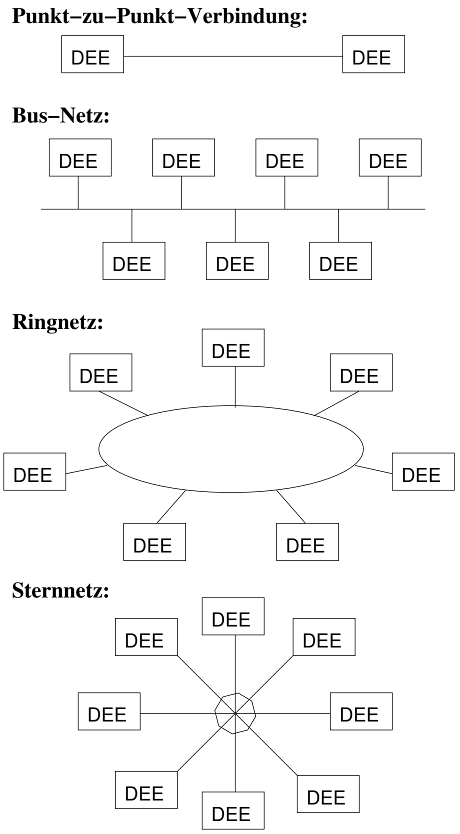
Was ist ein Rechnernetz?

- ein System aus Datenendeinrichtungen,
  (Supercomputer, Workstations, PCs, Terminals, . . .)
- die miteinander über Medien
  (elekrische Leiter, optische Leiter, Funkverbindungen, . . .)
- mittels Übertragungseinrichtungen
  (Anschalteinheiten, Modems, Multiplexer, Konzentratoren, . . .)
- und Vermittlungseinrichtungen
  (Bridges, Router, Switches, . . .)
- verbunden sind.

Ausprägungen von (Daten-) Transportnetzen (sogenannte Topologien):

- Punkt-zu-Punkt–Verbindung
- Bus-Netz
- Ringnetz
- Sternnetz
- heterogenes Netz (mit Subnetzen, die ggf. unterschiedlicher Ausprägung sein können)

Netz-Topologien



Aufgaben von Rechnernetzen

Wozu dienen Rechnernetze?

- aus Endanwendersicht:
  - Kommunikation zwischen Personen
    (email, Telekonferenz, Diskussionsforen, . . .)
  - Zugriff auf Informationen
    (ftp für Dateiübertragungen; WWW; fachspezifische Datenbanken; Video-on-Demand; . . .)
  - Benutzung entfernter Funktionen/Dienste
    (telebanking, teleshopping, . . .)
  - Kooperation von Programmabläufen
    (Client/Server Computing, Distributed Computing, . . .)
- aus Betreibersicht:
  - Funktionsverbund (spez. Hardware, Software, Datenbestände, . . .)
  - Lastverbund (Lastverteilung)
  - Verfügbarkeit (weniger Ausfallzeiten durch Redundanz im Netz)
  - Datenverbund

Charakterisierung von Rechnernetzen

Unterscheidung anhand von Merkmalen wie etwa:

- Komponententypen: homogen / heterogen
- Zugang: öffentlich / privat
- Topologie: ring- / stern- / . . . -förmig
- Vermittlungstechnik
- verwendete Protokolle
- . . .

Protokoll:

Die präzise Spezifikation in syntaktischer, prozeduraler und semantischer Hinsicht der Vorschriften und Regeln zum Informationsaustausch zwischen zwei Partnern auf der selben Stufe (hinsichtlich der Dienstebenen) eines Kommunikationssystems heißt *Protokoll*.

1.1. ISO-OSI–Referenzmodell

ISO = International Standard Organization

OSI = Open System Interconnection

Das ISO-Schichtenmodell:

Schicht 7	Anwendungsschicht	Application Layer
Schicht 6	Darstellungsschicht	Presentation Layer
Schicht 5	Kommunikationssteuerschicht	Session Layer
Schicht 4	Transportschicht	Transport Layer
Schicht 3	Vermittlungsschicht	Network Layer
Schicht 2	Sicherungsschicht	Data Link Layer
Schicht 1	Bitübertragungsschicht	Physical Layer

Schicht 1–3: Transportsystem

Schicht 4–7: Anwendungssystem

ISO-OSI–Referenzmodell (II)

Aufgaben der einzelnen Schichten:

Schicht 1:

- transparente Übertragung von Bitsequenzen
- Berücksichtigung der Chrakteristika einzelner Übertragungsmedien
  - mechanisch: Steckerform, Pinanordnung, . . .
  - physikalisch: elektrisch, optisch, . . . ; Signalisierung, Codierung, Modulation, . . .
  - funktional: z.B. Bedeutung von Pins
- Festlegung der Übertragungsart (z.B. analog/digital, simplex/duplex, . . .)

Protokolle: z.B. V.24, X.21, G.703

Schicht 2:

- Framing: Zusammenfassen von Bits zu höheren Strukturen (Blöcke, Frames)
- Blocksynchronisation
- Fehlerbehandlung

Protokolle: z.B.
HDLC (High-Level Data Link Control),
BSC bzw. BISYNC (Binary Synchronous Control)

ISO-OSI–Referenzmodell (III)

Schicht 3:

- Wegewahl (Routing), Vermittlung
- Internetworking (Wegewahl, Vermittlung zwischen Netzen)

Protokolle: z.B. IP (Internet Protocol), X.25-level 3

Schicht 4:

- netzunabhängiger Transport von Nachrichten zwischen zwei Endsystemen
- Anpassung der Übertragungsqualität des Transportsystems an die Erfordernisse des Anwendungssystems (Quality-of-Service Mapping)

Protokolle: z.B.
TCP (Transmission Control Protocol),
OSI-TP (Klassen 0–4)

Schicht 5:

Session: temporäre logische Verbindung zwischen zwei Anwendungssystemen

- Dialogführung: Dienste zur Steuerung der die Session unterhaltenden Prozesse mit Hilfe von Tokens (z.B. für Sendeberechtigung, Synchronistion, Verbindungslösung, . . .)
- Synchronisation: Festlegen von semantisch sinnvollen Wiederaufsatzpunkten (Hierarchie von Synchronisations-Punkten)

ISO-OSI–Referenzmodell (IV)

Schicht 6:

- Auflösen der Problematik unterschiedlicher lokaler Syntax
- Aushandeln einer konkreten Transfersyntax
- Abbilden der lokalen Syntax

Schicht 7:

- nach „oben“ offen, d.h. Anwendungsschicht kann selber wieder strukturiert sein
  (⇝ Module, Unterschichten)
- einige Standardanwendungen sind normiert
  - allgemeine Hilfsanwendungen
    (Filetransfer, Directory Services, e-mail, . . .)
  - branchenspezifische Anwendungen
    (z.B. Electronic Data Interchange EDI)
  - weitere Anwendungen
    (newsgroups, WWW, . . .)

1.2. Protokolle

Spezifikation des Ablaufs zum Informationsaustausch zwischen zwei Kommunikationspartnern

Beispiel: Protokoll, das Ablauf einer Prüfung beschreibt
(stark vereinfacht; *hier: keine Recherkommunikation*)

Verbale Beschreibung (hier als „Pseudocode“):
[P - Prüfer, K - Kandidat]

```
P: fragt nach Prüfungsfähigkeit
K: erklärt, ob prüfungsfähig
wenn Kandidat prüfungsfähig, dann {
    wiederhole {
        P: stellt Prüfungsfrage
        K: gibt Antwort
        wenn P mit Antwort nicht zufrieden, dann {
            P: stellt Nachfrage
            K: gibt Antwort
            wenn P weiterhin unzufrieden, dann {
                P: stellt weitere Nachfrage
                K: gibt Antwort
                wenn P immer noch nicht zufrieden, dann {
                    P: teilt richtige/erwartete Antwort mit
                }
            }
        }
    } solange Prüfungszeit noch nicht um
    P: teilt K Prüfungsergebnis mit
}
```


Protokolle

Aspekte bei der Festlegung von Protokollen:

- Adressierung
- Verbindungsaufbau
- Verbindungsabbau
- Sicherung der Übertragung
  - Quittierungsdienste
  - Fehlererkennung
  - Timer
  - Flußsteuerung
- Aufbau von Nachrichten (⇝ Syntax)
- Zusammenspiel von Protokollen

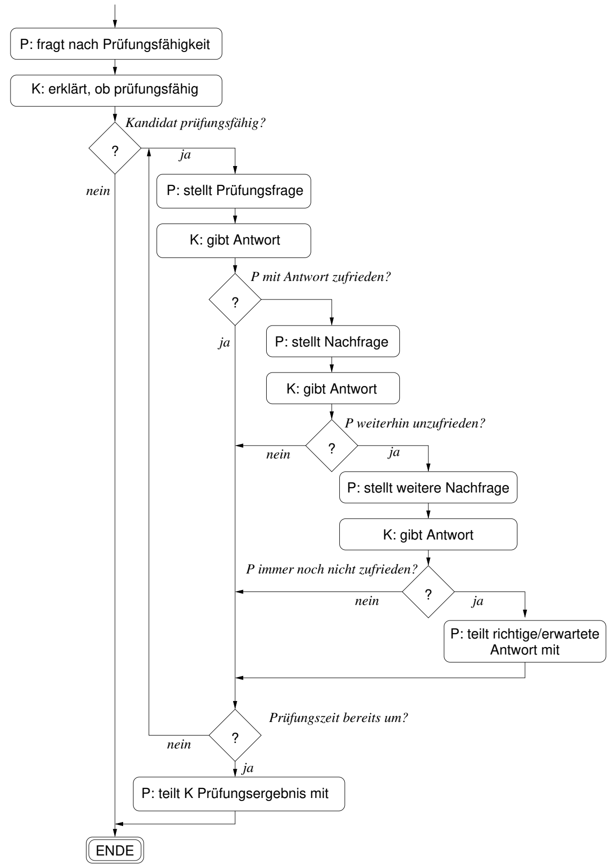
  ⇝ Protokoll-Hierarchie
  z.B. entsprechend dem ISO-OSI–Schichtenmodell
- Deadlock–Problematik

Protokolle

Darstellungsformen für Protokolle:

- Zustandsmodelle (endliche Automaten)
- Formale Sprachen
- Petrinetze
- Programmiersprachen–Modelle
- Abstrakte Datentypen
- Ablaufdiagramme
- Logik-Kalküle

Ablaufdiagramm für Beispiel-Protokoll



Namen, Adressen, Wege

Namen:

- kennzeichnen beliebige Objekte (z.B. Rechner, Gateways, Subnetze, Benutzer, Protokollinstanzen, . . .)
- häufig in symbolisierter Form (i.allg. für Menschen lesbar)
- strukturiert (i.allg. hierarchisch) oder unstrukturiert (flacher Namensraum)
- Bedeutung von Namen i.d.R. kontextabhängig, also nicht eindeutig

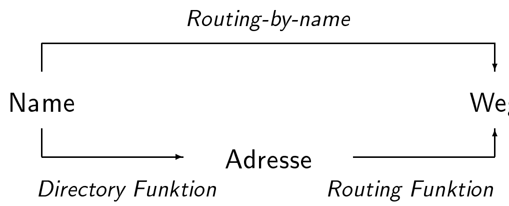
Adressen:

- dienen zur Lokalisierung von Objekten
- meist in numerischer Form (zur maschinellen Bearbeitung)
- strukturiert oder unstrukturiert
- Eindeutigkeit wichtig

Wege:

- ein Weg, ist eine Liste von Namen, die einen Pfad von der Quelle zum Ziel kennzeichnen

Namen, Adressen, Wege (II)



Sichere Übertragung

bei allen Übertragungsmedien (elektrische Leiter, optische Leiter, Funkübertragung, etc.) können Übertragungsfehler auftreten:

Verfälschung: ungewollte Änderungen von Bits

z.B. durch Störsignale, Crosstalks, Speicherfehler, . . .

Erkennung durch Prüfsummen, die mit übertragen werden;
auf erkannte Verfälschungen kann mit negativer Quittung und Wiederholung der Übertragung reagiert werden

Wiederholung kann durch geeignete Error Correcting Codes vermieden werden, die bei erkannten Verfälschungen Korrektur durch den Empfänger ermöglichen

Verlust der Daten

z.B. durch Verfälschung des Headers (Verwaltungsinformation) oder Verlust einer Nachricht im Netz

Erkennung auf Empfängerseite über Sequenznummern in Nachrichten (die zusammengehören) bzw. auf Absenderseite durch fehlende Quittung

Behebung durch wiederholte Übertragung

Sichere Übertragung (II)

Duplikate entstehen etwa, wenn Quittungen verloren gehen oder eine Übertragungswiederholung vom Empfänger zu früh angestossen wurde

Erkennung über Sequenznummern
(Duplikat dann einfach ignorieren)

falsche Reihenfolge beim Eingang von Nachrichten

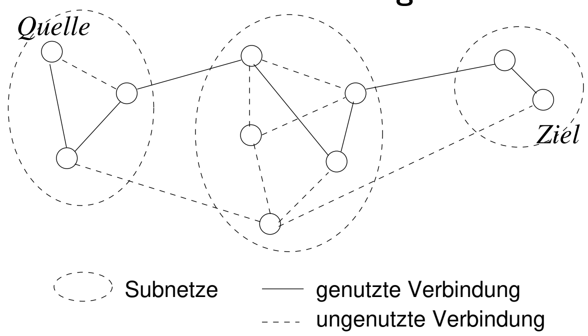
z.B. durch unterschiedliche Übertragungswege der einzelnen Nachrichten im Netz

Erkennung über Sequenznummern

Fehladressierung durch Verfälschung der Adresse

Sequenznummern:
bei der Kommunikation zwischen zwei Partnern numeriert jeder Partner seine Nachrichten fortlaufend

Internetworking



Internetworking bedeutet: die Bildung eines Verbundnetzes aus Subnetzen mittels Routern

Aufgaben der Router:

- Adressierung über Subnetzgrenzen hinweg (Adreßabbildung)
- Anpassung der PDU-Struktur (*Protocol Data Unit*) (Fragmentierung, Blocking, Formatumwandlung)
- Anpassung der Protokollparameter (z.B. Timer, Wiederholungszahl, . . .)
- Anpassung von Fehlerbehandlungsmechanismen
- Abbildung von Diensten (z.B. verbindungsorientiert $\leftrightarrow$ verbindungslos)
- Abbildung von Wegewahlmechanismen auf globale Wegewahl

Vermittlungsverfahren

im folgenden 3 Varianten der Vermittlung betrachtet

1. Leitungsvermittlung (Durchschaltung, circuit switching)

Verbindungaufbau gemäß Wegewahlalgorithmus durch das Netz zum Zielsystem

nach positiver Quittung steht für die gesamte Verbindungszeit ein dedizierter Übertragungskanal über die gewählten Leitungen zur Verfügung

(z.B. Telefon, DatexL, ISDN B-Kanäle, . . .)

2. Nachrichtenvermittlung (Streckenvermittlung, message switching, store-and-forward)

jedes Übertragungssystem entlang des Weges nimmt komplette Nachricht entgegen und speichert diese zwischen

wenn nächstes Wegstück frei ist, wird die Nachricht weitergesendet

(z.B. Electronic Mail, IP – Internet Protocol, . . .)

Vermittlungsverfahren (II)

3. Paketvermittlung (packet switching)

Spezialfall der Nachrichtenvermittlung

ursprüngliche Nachrichten (mit unterschiedlichen Längen) werden in Pakete (konstanter Länge) zerlegt

jedes Paket wird dann nach dem Prinzip der Nachrichtenvermittlung behandelt

$\rightsquigarrow$ Pipelining-Effekt

Wegewahlverfahren

Problemstellung:
Finden eines Wegewahlalgorithmus

Zielfunktionen:

- geringe Übertragungszeiten (z.B. Knotenanzahl, Leitungslängen, Leitungskapazitäten)
- geringe Übertragungskosten
- gute Leitungsauslastung
- Netzdurchsatzoptimierung

$\rightsquigarrow$ Zielkonflikte

Anforderungen an den Algorithmus:

- einfach (geringe Komplexität)
- adaptiv (bzgl. Topologie und Laständerungen)
- robust (bzgl. Fehlersituationen)
- fair (bzgl. Einzelverbindungen)

$\rightsquigarrow$ möglichst vollständige Beschreibung des Netz erforderlich

Klassifikation von Wegewahlverfahren

- nichtadaptive Verfahren
  - mit Wegewahltabellen (directory routing)
  - ohne Routing-Tabellen (floating)
- adaptive Verfahren
  (bzgl. Last- und Topologieänderungen)
  (getriggerte oder periodische Anpassung)
  - zentral (Routing Center)
  - dezentral isoliert (hot potato)
  - dezentral unter Kenntnis der Nachbarn
  - dezentral unter Kenntnis aller Knoten
  - Hybridverfahren

Wegewahlverfahren: Netzbeschreibung

mathematische Beschreibung eines Netzes als annotierter Graph:

$$N = (K, L)$$

mit

K :	Menge der Knoten (-indizes)
$L \subseteq K \times K$:	Menge der Verbindungen (Leitungen)

Ferner:

$A(j) \;=\; \{i \in K \mid (j,i) \in L\}$	Menge der Nachbarknoten von j
$W_{q \to z}$	sei ein Weg von Quelle q nach Ziel z [ein Weg ist durch die Menge von Kanten aus L beschrieben, die auf diesem Weg liegen]
D_{qz} :	$W_{q \to z} \to I\!R^+$ (Kostenfunktion) $D_{ij} = D_{ij}(W_{i \to j})$ wenn $W_{i \to j} = \{(i,j)\}$
α^{opt}	Nachbar auf dem optimalen Weg
$W_{q \to z}^{opt}$	der optimale Weg
D_{qz}^{opt}	Kosten des optimalen Wegs

Wegewahlverfahren: Netzbeschreibung (II)

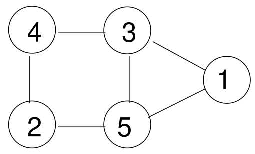
übliche Annahme über Summation der Kosten entlang eines Weges:

$$D_{qz}(W_{q \to z}) = \Sigma_{(i,j) \in W_{q \to z}} D_{ij}$$

weitere Forderung:
sei α ein Knoten der auf dem optimalen Weg $W_{q \to z}^{opt}$ von q nach z liegt

$$D_{qz}^{opt} = D_{q\alpha}^{opt} + D_{\alpha z}^{opt}$$

Beispiel:



Mit $\forall (i,j) \in L : D_{ij} = 10$ gilt z.B.:

$W_{2,1}^{opt} = \{(2,5),(5,1)\}; D_{2,1}^{opt} = 20$
$W_{2,3}^{opt} = \{(2,5),(5,3)\}$ oder $\{(2,4),(4,3)\}$
$W_{2,4}^{opt} = \{(2,4)\}$
$W_{2,5}^{opt} = \{(2,5)\}$

Berechnung optimaler Wege

am Beispiel des SDF-Verfahrens
(SDF: Shortest Delay time First)

zusätzliche Bezeichnungen / Abkürzungen:

- QSB – Quelle-Senken-Baum:
  Baum mit Anfangskonten des Weges (Quelle) als Wurzel und mit Ziel(en) (Senken) als Blätter oder innere Knoten;
  (optimaler) Weg ist der Pfad im Baum von der Wurzel zu dem Knoten, der das Ziel repräsentiert
- $H = \{j \in K | j \in A(k)$ wobei $k \in QSB \wedge j \notin QSB\}$
  (Kandidaten für QSB)
- q Quelle des gesuchten Wegs

Idee des folgenden Algorithmus zur Konstruktion eines QSB:

- beginnt mit Quell-Knoten des gesuchten Wegs
- fügt sukzessiv Knoten zum QSB hinzu, für die der/ein optimaler Weg gefunden wurde
- dazu werden immer die Nachbarn der zuletzt im QSB eingefügten Knoten als Kandidaten betrachtet
  $\leadsto$ Menge H

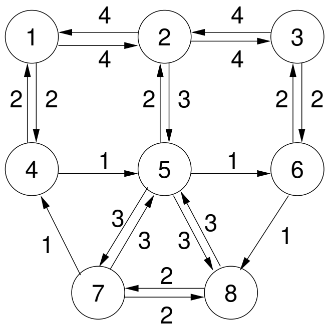
Berechnung optimaler Wege (II)

Algorithmus:

Wurzel in QSB := q ; QSB wird mit q als Wurzel initialisiert
$H = \emptyset$; Kandidatenmenge leer
$D^{opt}_{q,q} = 0$; keine Kosten für Weg von q nach q
$x := q$; x ist der zuletzt in QSB eingetragene Knoten
LOOP ; Nachbarn von x werden betrachtet
  FOR ALL $j \in A(x)$ **DO**
    $\delta = D^{opt}_{q,x} + D_{x,j}$; Verzögerungszeit bei Weg über x
    IF $j \notin QSB \wedge j \notin H$ **THEN**
      $H := H \cup \{j\}$
      $D^*_{q,j} := \delta$; Kosten des aktuellen Wegs von q nach j
      $V_j := x$; bislang bester Weg zu j über aktuelles x
    FI
    IF $j \in H \wedge \delta < D^*_{q,j}$ **THEN** ; besseren Weg gefunden
      $D^*_{q,j} := \delta$; überschreibt bisherige beste Kosten
      $V_j := x$; neuer bester Weg zu j über aktuelles x
    FI
  OD
  IF $H = \emptyset$ **THEN STOP**
  $x :=$ Knoten j aus (H) mit kleinstem $D^*_{q,j}$
  x kommt in QSB als Sohn von V_x
  $D^{opt}_{q,x} := D^*_{q,x}$
  $H := H - \{x\}$; x wird aus H gelöscht
END LOOP

Beispiel: SDF-Verfahren

Netz mit Kosten für die Verbindungen:



$K = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$
L: siehe Abbildung
D_{ij} für Kanten $(i, j) \in L$: siehe Abbildung

Gesucht: optimaler Weg von Knoten 1 nach Knoten 8

Beispiel: SDF-Verfahren (II)

Durchführung des Algorithmus:

0. Initialisierung:
   QSB besteht nur aus Knoten 1 (als Wurzel)
   $H := \emptyset$
   $D^{opt}_{1,1} := 0$
   $x := 1$
1. Durchlauf der Schleife: $A(1) = \{2, 4\}$
   (1) $j = 2$, da $2 \in A(1)$:
     $\delta := 4$ $(D^{opt}_{1,1} + D_{1,2} = 0 + 4 = 4)$
     $j \notin QSB \wedge j \notin H$, daher:
     $H := \{2\}$ $(H \cup \{j\} = \emptyset \cup \{2\})$
     $D^*_{1,2} := 4$ (δ)
     $V_2 := 1$ (x)
   (2) $j = 4$, da $4 \in A(1)$:
     $\delta := 2$ $(D^{opt}_{1,1} + D_{1,4} = 0 + 2 = 2)$
     $j \notin QSB \wedge j \notin H$, daher:
     $H := \{2, 4\}$ $(H \cup \{j\} = \{2\} \cup \{4\})$
     $D^*_{1,4} := 2$ (δ); $V_4 := 1$ (x)
   da $H \neq \emptyset$, weitermachen
   $x := 4$ (da $D^*_{1,4} < D^*_{1,2}$)
   4 wird in QSB eingetragen mit Vaterknoten 1
   $D^{opt}_{1,4} := 2$
   $H := \{2\}$

Beispiel: SDF-Verfahren (III)

2. Durchlauf der Schleife: $A(4) = \{1, 5\}$
   (1) $j = 1$:
   $\delta := 4$ ($D^{opt}_{1,4} + D_{4,1} = 2 + 2 = 4$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$: keine weiteren Berechnungen
   (2) $j = 5$:
   $\delta := 3$ ($D^{opt}_{1,4} + D_{4,5} = 2 + 1 = 3$)
   $j \notin QSB \wedge j \notin H$, daher:
   $H := \{2, 5\}$ ($H \cup \{j\} = \{2\} \cup \{5\}$)
   $D^*_{1,5} := 3$; $V_5 := 4$
   da $H \neq \emptyset$, weitermachen
   $x := 5$ (Knoten aus H mit kleinsten Kosten)
   5 wird in QSB eingetragen mit Vaterknoten 4
   $D^{opt}_{1,5} := 3$
   $H := \{2\}$

Beispiel: SDF-Verfahren (IV)

3. Durchlauf der Schleife: $A(5) = \{2, 6, 7, 8\}$
   (1) $j = 2$:
   $\delta := 5$ ($D^{opt}_{1,5} + D_{5,2} = 3 + 2 = 5$)
   $j \in H$, aber nicht $\delta < D^*_{1,2}$
   (2) $j = 6$:
   $\delta := 4$ ($D^{opt}_{1,5} + D_{5,6} = 3 + 1 = 4$)
   $j \notin QSB \wedge j \notin H$, daher:
   $H := \{2, 6\}$ ($H \cup \{j\} = \{2\} \cup \{6\}$)
   $D^*_{1,6} := 4$; $V_6 := 5$
   (3) $j = 7$:
   $\delta := 6$ ($D^{opt}_{1,5} + D_{5,7} = 3 + 3 = 6$)
   $j \notin QSB \wedge j \notin H$, daher:
   $H := \{2, 6, 7\}$ ($H \cup \{j\} = \{2, 6\} \cup \{7\}$)
   $D^*_{1,7} := 6$; $V_7 := 5$
   (4) $j = 8$:
   $\delta := 6$ ($D^{opt}_{1,5} + D_{5,8} = 3 + 3 = 6$)
   $j \notin QSB \wedge j \notin H$, daher:
   $H := \{2, 6, 7, 8\}$ ($H \cup \{j\} = \{2, 6, 7\} \cup \{8\}$)
   $D^*_{1,8} := 8$; $V_8 := 5$
   da $H \neq \emptyset$, weitermachen
   $x := 2$ (Knoten aus H mit kleinsten Kosten; 2 oder 6)
   2 wird in QSB eingetragen mit Vaterknoten 1
   $D^{opt}_{1,2} := 4$
   $H := \{6, 7, 8\}$

Beispiel: SDF-Verfahren (V)

4. Durchlauf der Schleife: $A(2) = \{1, 3, 5\}$
   (1) $j = 1$:
   $\delta := 8$ ($D^{opt}_{1,2} + D_{2,1} = 4 + 4 = 8$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$, keine weiteren Berechnungen
   (2) $j = 3$:
   $\delta := 8$ ($D^{opt}_{1,2} + D_{2,3} = 4 + 4 = 8$)
   $j \notin QSB \wedge j \notin H$, daher:
   $H := \{3, 6, 7, 8\}$ ($H \cup \{j\} = \{6, 7, 8\} \cup \{3\}$)
   $D^*_{1,3} := 8$; $V_3 := 2$
   (3) $j = 5$:
   $\delta := 7$ ($D^{opt}_{1,2} + D_{2,5} = 4 + 3 = 7$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$, keine weiteren Berechnungen
   da $H \neq \emptyset$, weitermachen
   $x := 6$ (Knoten aus H mit kleinsten Kosten!)
   6 wird in QSB eingetragen mit Vaterknoten 5
   $D^{opt}_{1,6} := 4$
   $H := \{3, 7, 8\}$

Beispiel: SDF-Verfahren (VI)

5. Durchlauf der Schleife: $A(6) = \{3, 8\}$
   (1) $j = 3$:
   $\delta := 6$ ($D^{opt}_{1,6} + D_{6,3} = 4 + 2 = 6$)
   $j \in H \wedge \delta < D^*_{1,3}$, daher:
   $D^*_{1,3} := 6$; $V_3 := 6$
   (2) $j = 8$:
   $\delta := 4$ ($D^{opt}_{1,6} + D_{6,8} = 4 + 1 = 5$)
   $j \in H \wedge \delta < D^*_{1,8}$, daher:
   $D^*_{1,8} := 5$; $V_8 := 6$
   da $H \neq \emptyset$, weitermachen
   $x := 8$ (Knoten aus H mit kleinsten Kosten!)
   8 wird in QSB eingetragen mit Vaterknoten 6
   $D^{opt}_{1,8} := 5$
   $H := \{3, 7\}$
6. Durchlauf der Schleife: $A(8) = \{5, 7\}$
   (1) $j = 5$:
   $\delta := 8$ ($D^{opt}_{1,8} + D_{8,5} = 5 + 3 = 8$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$: keine weiteren Berechnungen
   (2) $j = 7$:
   $\delta := 7$ ($D^{opt}_{1,8} + D_{8,7} = 5 + 2 = 7$)
   da $j \in H$, aber nicht $\delta < D^*_{1,7}$: keine Veränderung
   da $H \neq \emptyset$, weitermachen
   $x := 3$ (Knoten aus H mit kleinsten Kosten: 3 oder 7!)
   3 wird in QSB eingetragen mit Vaterknoten 6
   $D^{opt}_{1,3} := 6$
   $H := \{7\}$

Beispiel: SDF-Verfahren (VII)

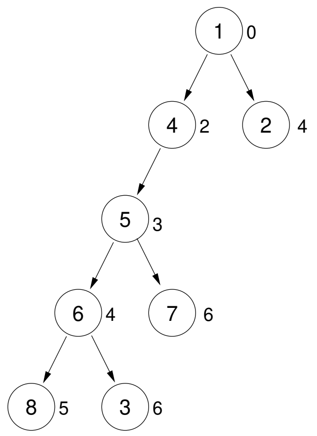
7. Durchlauf der Schleife: $A(3) = \{2, 6\}$
   (1) $j = 2$:
   $\delta := 10$ ($D^{opt}_{1,3} + D_{3,2} = 6 + 4 = 10$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$: keine weiteren Berechnungen
   (2) $j = 6$:
   $\delta := 8$ ($D^{opt}_{1,3} + D_{3,6} = 6 + 2 = 8$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$: keine weiteren Berechnungen
   da $H \neq \emptyset$, weitermachen
   $x := 7$ (Knoten aus H mit kleinsten Kosten!)
   7 wird in QSB eingetragen mit Vaterknoten 5
   $D^{opt}_{1,7} := 6$
   $H := \{\}$
8. Durchlauf der Schleife: $A(7) = \{4, 5, 8\}$
   (1) $j = 4$:
   $\delta := 7$ ($D^{opt}_{1,7} + D_{7,4} = 6 + 1 = 7$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$: keine weiteren Berechnungen
   (2) $j = 5$:
   $\delta := 9$ ($D^{opt}_{1,7} + D_{7,5} = 6 + 3 = 9$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$: keine weiteren Berechnungen
   (3) $j = 8$:
   $\delta := 8$ ($D^{opt}_{1,7} + D_{7,8} = 6 + 2 = 8$)
   da $j \in QSB \wedge j \notin H$: keine weiteren Berechnungen
   da nun $H = \emptyset$, ENDE !

Beispiel: SDF-Verfahren (VIII)

Ergebnis: $D^{opt}_{1,8} = 5$

zugehöriger Weg kann aus dem QSB abgelesen werden:
1, 4, 5, 6, 8
(da: $V_8 = 6$, $V_6 = 5$, $V_5 = 4$, $V_4 = 1$)

berechneter Quelle-Senken-Baum:
(mit Kosten bzw. Delay $D_{1,j}$ für jeden Knoten j)



Beispiel: SDF-Verfahren (IX)

Anmerkungen zum Algorithmus:

- Wenn es von a nach b zwei optimale Wege gibt, hängt es von der Reihenfolge der Berechnung ab ($\rightarrow$ **FOR ALL** $j \in A(x)$ . . .), welcher der beiden Wege zuerst gefunden und als optimaler Weg festgehalten wird.
- Bei der Auswahl des Knoten aus H mit den kleinsten Kosten kann es mehrere Möglichkeiten geben:

  Auswahl beeinflußt die Berechnungsreihenfolge, aber nicht das Endergebnis!
- Der Algorithmus berechnet für einen Quellknoten alle optimalen Wege zu allen anderen Knoten.

  Wenn nur ein optimaler Weg zwischen zwei Knoten gesucht ist, wird zu viel berechnet;
  Abhilfe: Abbrechen, sobald Zielknoten im QSB eingefügt wird!
- Es handelt sich hier um ein statisches Verfahren, das gut geeignet ist, um a priori optimale Wege zu berechnen, wenn das ganze Netz und die Übertragungskosten (-zeiten) für die Leitungen bekannt sind.

  Dynamische Aspekte werden nicht berücksichtigt: z.B. aktuelle Auslastung der Leitungen, Ausfall von Leitungen und/oder Knoten, . . .
- Laufzeitkomplexität ?