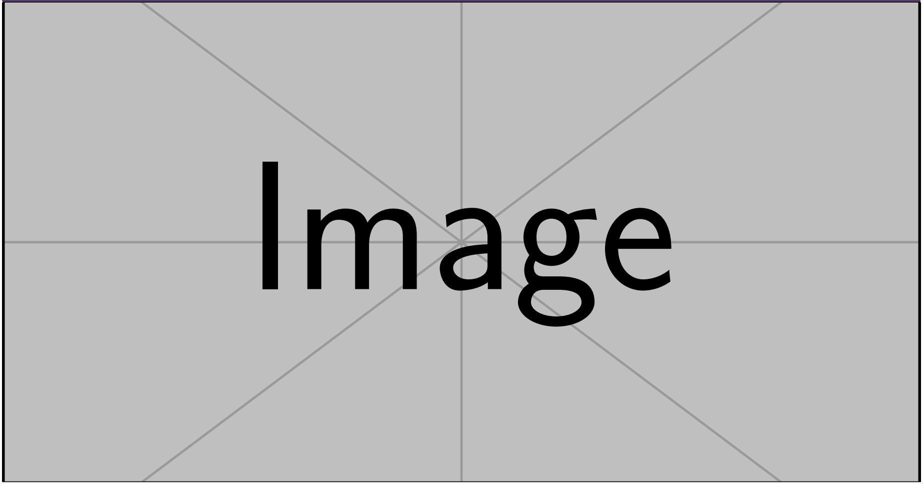
Seminar Algorithmen zum Fahrplanentwurf

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Graphenmodelle



Analoge Fahrpläne

Wie man sie kennt und nie benutzt...

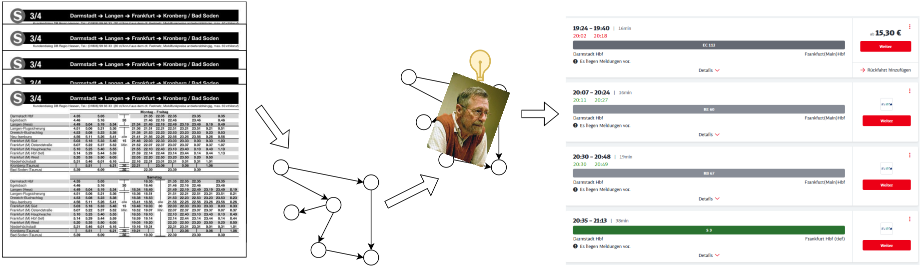
S 3/4 Darmstadt → Langen → Frankfurt → Kronberg / Bad Soden

Kundendialog DB Regio Hessen, Tel.: (01806) 99 66 33 (20 ct/Anruf aus dem dt. Festnetz, Mobilfunkpreise anbieterabhängig, max. 60 ct/Anruf)

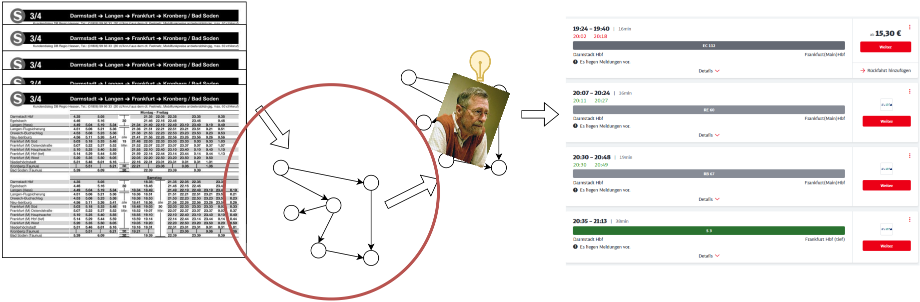
Montag - Freitag													
Darmstadt Hbf	4.35		5.05				21.35	22.05	22.35		23.35		0.35
Egelsbach	4.46		5.16		30		21.46	22.16	22.46		23.46		0.46
Langen (Hess)	4.49	5.04	5.19	5.34		21.34	21.49	22.19	22.49	23.19	23.49	0.19	0.49
Langen-Flugsicherung	4.51	5.06	5.21	5.36		21.36	21.51	22.21	22.51	23.21	23.51	0.21	0.51
Dreieich-Buchschlag	4.53	5.08	5.23	5.38		21.38	21.53	22.23	22.53	23.23	23.53	0.23	0.53
Neu-Isenburg	4.56	5.11	5.26	5.41	alle	21.41	21.56	22.26	22.56	23.26	23.56	0.26	0.56
Frankfurt (M) Süd	5.03	5.18	5.33	5.48	15	21.48	22.03	22.33	23.03	23.33	0.03	0.33	1.03
Frankfurt (M) Ostendstraße	5.07	5.22	5.37	5.52	Min	21.52	22.07	22.37	23.07	23.37	0.07	0.37	1.07
Frankfurt (M) Hauptwache	5.10	5.25	5.40	5.55		21.55	22.10	22.40	23.10	23.40	0.10	0.40	1.10
Frankfurt (M) Hbf (tief)	5.14	5.29	5.44	5.59		21.59	22.14	22.44	23.14	23.44	0.14	0.44	1.13
Frankfurt (M) West	5.20	5.35	5.50	6.05		22.05	22.20	22.50	23.20	23.50	0.20	0.50	
Niederhöchstadt	5.31	5.46	6.01	6.16		22.16	22.31	23.01	23.31	0.01	0.31	1.01	
Kronberg (Taunus)		5.51		6.21	30	22.21		23.06		0.06		1.06	
Bad Soden (Taunus)	5.39		6.09		30		22.39		23.39		0.39		

Samstag														
Darmstadt Hbf	4.35		5.05				18.35		21.35	22.05	22.35		23.35	
Egelsbach	4.46		5.16		30		18.46		21.46	22.16	22.46		23.46	
Langen (Hess)	4.49	5.04	5.19	5.34		18.34	18.49		21.49	22.19	22.49	23.19	23.49	0.19
Langen-Flugsicherung	4.51	5.06	5.21	5.36		18.36	18.51		21.51	22.21	22.51	23.21	23.51	0.21
Dreieich-Buchschlag	4.53	5.08	5.23	5.38		18.38	18.53		21.53	22.23	22.53	23.23	23.53	0.23
Neu-Isenburg	4.56	5.11	5.26	5.41	alle	18.41	18.56	alle	21.56	22.26	22.56	23.26	23.56	0.26
Frankfurt (M) Süd	5.03	5.18	5.33	5.48	15	18.48	19.03	30	22.03	22.33	23.03	23.33	0.03	0.33
Frankfurt (M) Ostendstraße	5.07	5.22	5.37	5.52	Min	18.52	19.07	Min	22.07	22.37	23.07	23.37	0.07	0.37
Frankfurt (M) Hauptwache	5.10	5.25	5.40	5.55		18.55	19.10		22.10	22.40	23.10	23.40	0.10	0.40
Frankfurt (M) Hbf (tief)	5.14	5.29	5.44	5.59		18.59	19.14		22.14	22.44	23.14	23.44	0.14	0.44
Frankfurt (M) West	5.20	5.35	5.50	6.05		19.05	19.20		22.20	22.50	23.20	23.50	0.20	0.50
Niederhöchstadt	5.31	5.46	6.01	6.16		19.16	19.31		22.31	23.01	23.31	0.01	0.31	1.01
Kronberg (Taunus)		5.51		6.21	30	19.21				23.06		0.06		1.06
Bad Soden (Taunus)	5.39		6.09		30		19.39		22.39		23.39		0.39	

Fahrplanauskunftssysteme



Fahrplanauskunftssysteme



Frage 1

Wie wandle ich Fahrpläne zu Graphen um?

Frage 2

Wie modelliere ich meinen Graphen, um das Earliest-Arrival Problem zu lösen?

Überblick

- Grundlagen
- Das 1. Graphenmodell
  - Verfeinerungen
- Das 2. Graphenmodell
  - Verfeinerungen
- Vergleiche
- Zusammenfassung

1. Griff in die Terminologie-Kiste

Züge und Stationen

Was ist ein Zug?

1. Griff in die Terminologie-Kiste

Züge und Stationen

Was ist ein Zug?

1. Griff in die Terminologie-Kiste

Züge und Stationen

Was ist ein Zug?

1. Griff in die Terminologie-Kiste
Züge und Stationen

Was ist ein Zug?

1. Griff in die Terminologie-Kiste

Züge und Stationen

Was ist eine Station?

1. Griff in die Terminologie-Kiste

Züge und Stationen

Was ist eine Station?

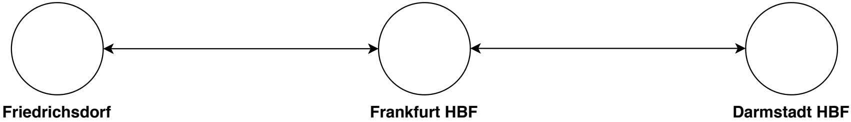
Größenordnungen

- Ein paar Zahlen im Jahr 2008 (**nur** Züge):

Anzahl	
Stationen	etwa™ 5000
Züge	68073
Fußwege	425

Wie modelliere ich einen Fahrplan als Graphen?

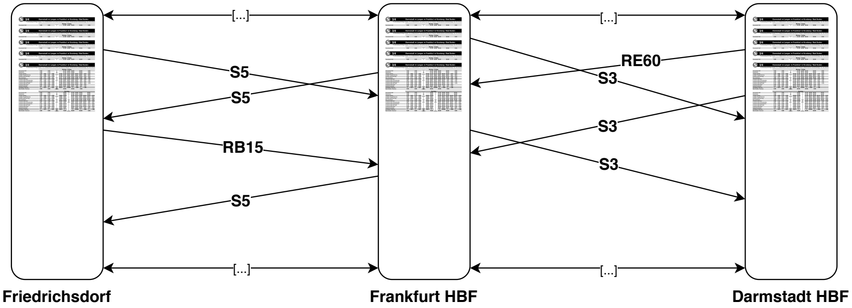
- Simple Idee: Knoten sind Stationen, Kanten sind Verbindungen



Was ist das Problem hier?

Wie modelliere ich einen Fahrplan als Graphen?

- Wir müssen irgendwie Zeitverhältnisse innerhalb des Graphen darstellen!



Was ist das Problem hier?

Probleme

Die es zu lösen gilt...

- Zeitverhältnisse im Graphen

Probleme

Die es zu lösen gilt...

- Zeitverhältnisse im Graphen
- **Takt**fahrpläne

Probleme

Die es zu lösen gilt...

- Zeitverhältnisse im Graphen
- **Takt**fahrpläne
- Umstiege bzw. Umsteigezeiten

Probleme

Die es zu lösen gilt...

- Zeitverhältnisse im Graphen
- **Takt**fahrpläne
- Umstiege bzw. Umsteigezeiten
- Fußwege zwischen / innerhalb von Stationen

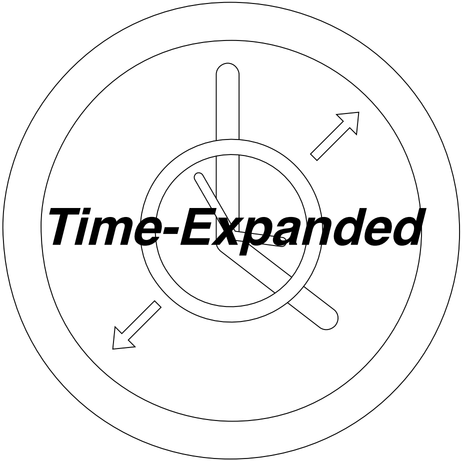
Probleme

Die es zu lösen gilt...

- Zeitverhältnisse im Graphen
- **Takt**fahrpläne
- Umstiege bzw. Umsteigezeiten
- Fußwege zwischen / innerhalb von Stationen
- ~~Intermodalität~~

Zwei gängige Modelle

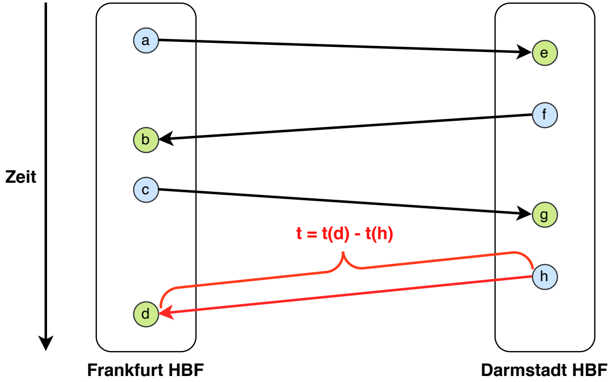
Time-Expanded vs. Time-Dependent


Time-Expanded

Das Time-Expanded Modell

Train-Edges

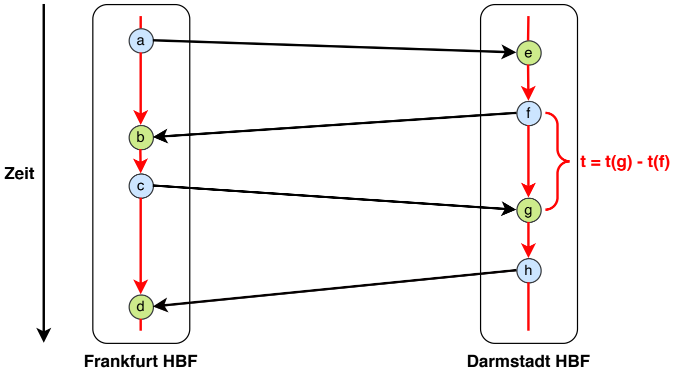
- Modelliere jedes "**Event**" innerhalb einer Station als eigenen Knoten.



Das Time-Expanded Modell

Waiting-Edge

- Erstelle eine Stationsinterne Kante, die **Exchange-Edge**.



Das Time-Expanded Modell

Was bringt uns das Ganze jetzt?

Kanten innerhalb einer Station $\approx$ "Umstiege"

16:30 – 17:17 | [redacted] | 1 Umstieg

RE 60	RE 16

Darmstadt Hbf — Friedrichsdorf(Taunus)

Es liegen Meldungen vor.

Details

16:30 **Darmstadt Hbf** › Gl. 7

21min

RE 60

nach Frankfurt(Main)Hbf

Beförderer | Fahrradmitnahme | Weitere Informationen

Zuginformationen

1 Haltestelle

16:51 **Frankfurt(Main)Hbf** › Gl. 10

0min Umstieg

16:51 **Frankfurt(Main)Hbf** › Gl. 14

26min

RE 16

nach Friedberg(Hess)

Beförderer | Fahrradmitnahme | Weitere Informationen

Zuginformationen

2 Haltestellen

17:17 **Friedrichsdorf(Taunus)** › Gl. 5

16:30 – 17:17 | [redacted] | 1 Umstieg

RE 60	RE 16

Darmstadt Hbf — Friedrichsdorf(Taunus)

Es liegen Meldungen vor.

Details

16:30 **Darmstadt Hbf** › Gl. 7

21min

RE 60

nach Frankfurt(Main)Hbf

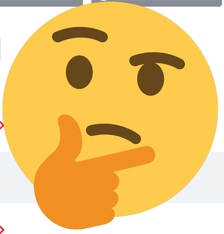
Beförderer | Fahrradmitnahme | Weitere Informationen

Zuginformationen

1 Haltestelle

16:51 **Frankfurt(Main)Hbf** › Gl. 10

0min Umstieg



16:51 **Frankfurt(Main)Hbf** › Gl. 14

26min

RE 16

nach Friedberg(Hess)

Beförderer | Fahrradmitnahme | Weitere Informationen

Zuginformationen

2 Haltestellen

17:17 **Friedrichsdorf(Taunus)** › Gl. 5

Frage 3

Wie modelliere ich Umstiegszeiten mit "Puffer"?

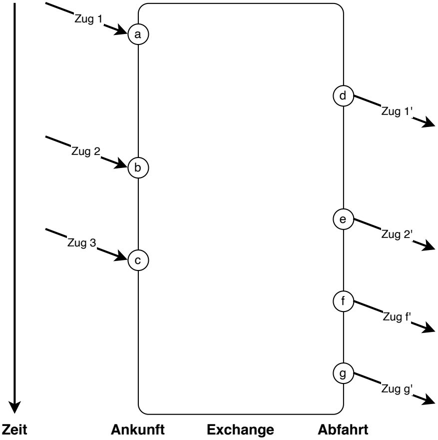
2. Griff in die Terminologie-Kiste

Realistische Umstiegsregeln

- Definiere Konstante und Variable Umstiegsregeln:
  1. Standard-Umstiegszeit für alle Züge
  2. Regeln basierend auf Transferklassen & Zuglinien
  3. Regeln zwischen einzelnen Zügen

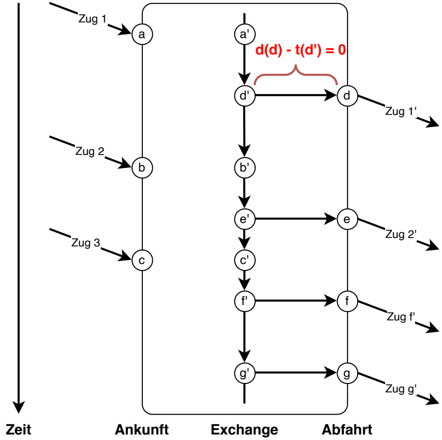
Konstante Umstiegszeiten

- Spalte Exchange-Edge in Ankunfts- und Abfahrtsknoten



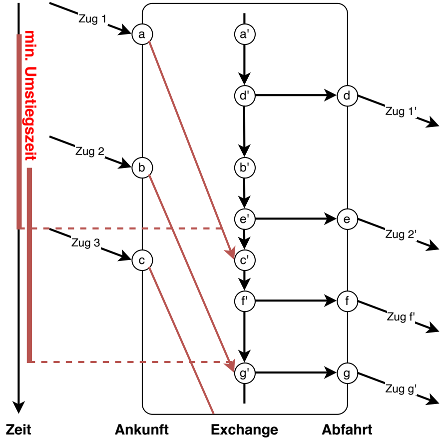
Konstante Umstiegszeiten

- Erstelle neue Exchange Edge



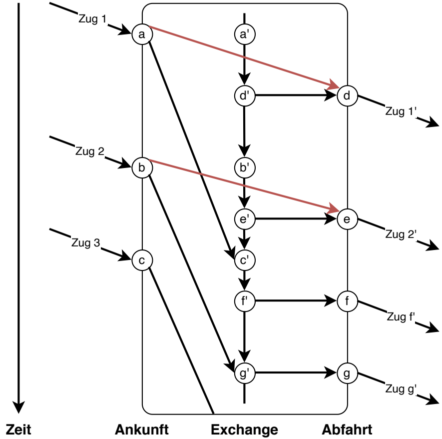
Konstante Umstiegszeiten

- Kanten von Ankunft → Exchange-Edge basierend auf min. Umstiegszeit



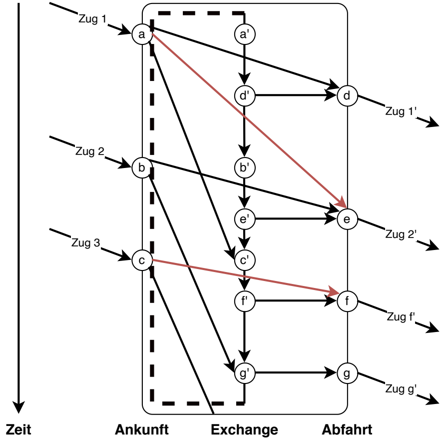
Variable Umstiegszeiten

- Erstelle Kanten von Ankunft $\rightarrow$ Abfahrt des selben Zuges



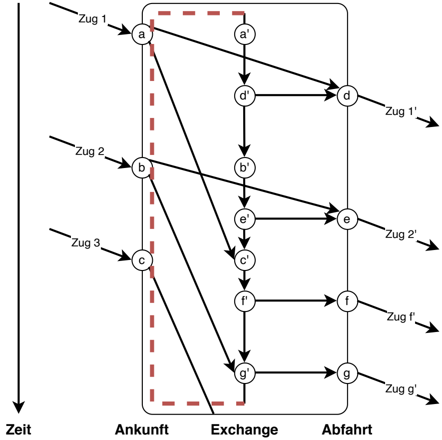
Variable Umstiegszeiten

- Weitere variable Umstiegszeiten als zzgl. Kanten



Taktfahrplanmodellierung

- Taktfahrplanmodellierung via Exchange-Edge-Schleife



Verfeinerung 1: Verkehrstage

Problem: Der Takt unseres Fahrplans ist nicht nur ein Tag!

- Wie würde unser Graph wachsen, wenn wir N Tage modellieren würden?
  - Wir hätten etwa N-mal so viele Knoten und Kanten!

Verfeinerung 1: Verkehrstage

- Versehe Knoten mit absoluter Zeit $[0, N \cdot 1440]$
- Versehe Kanten mit einer Liste an Verkehstagen: $[d]$, $d \in N$
- Beim SP-Durchlauf:

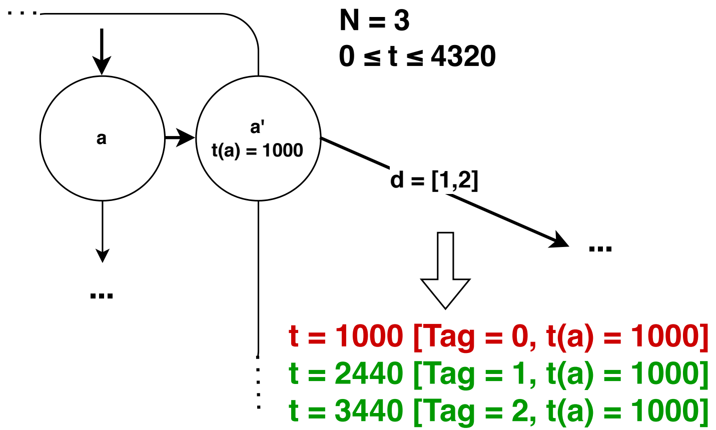
$$d_i = floor(\frac{t_{Anfrage}}{1440})$$

- Und wenn der Zug an Tag d_i fährt:

$$length(E) = (t_{Ankunft} - t_{Abfahrt}) \mod 1440$$

Verfeinerung 1: Verkehrstage

Das ganze als Visuelles Beispiel



Verfeinerung 1: Verkehrstage

Problem: Wie behandeln wir besuchte Knoten beim SP-Durchlauf, die invalide sind?

[1] Pyrga et. al.: Efficient Models for Timetable Information in Public Transportation Systems

Verfeinerung 1: Verkehrstage

Problem: Wie behandeln wir besuchte Knoten beim SP-Durchlauf, die invalide sind?

- Als Beispiel am Dijkstra:
  - $dist \to \infty$
  - Füge Knoten wieder am Ende des Sets ein ("Nächster" Tag).

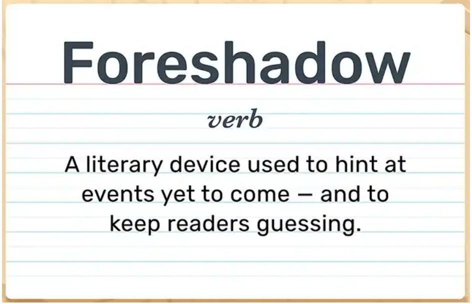
Weitere Verfeinerungen sind möglich[1]...

[1] Pyrga et. al.: Efficient Models for Timetable Information in Public Transportation Systems

Verfeinerung 2: Fußwege
Die Rückkehr der Terminologie-Kiste

Was macht Fußwege so besonders?

- Fußwege können zu jeder Zeit genutzt werden
- Man könnte sagen sie sind... *Zeitabhängig* (Time-Dependent)...



Verfeinerung 2: Fußwege

- Alle Fußwege im Graphen speichern ist nicht sinnvoll.

Verfeinerung 2: Fußwege

- Alle Fußwege im Graphen speichern ist nicht sinnvoll.
- Speichere Wege in jeder Station, maskiere Wege in Suchanfragen als Kanten zwischen Stationen
  - Durchsuche Fußwege, wenn eine Arrival-Node bearbeitet wird
- Beachte Fußwege beim Start einer Reise!

Größenordnungen

- Ein paar Zahlen im Jahr 2008 (**nur** Züge):

Anzahl an Knoten	
Ankunft	801.8 Tsd.
Abfahrt	801.8 Tsd.
Change-Departure	556.6 Tsd.
Gesamt	2160.2 Tsd.

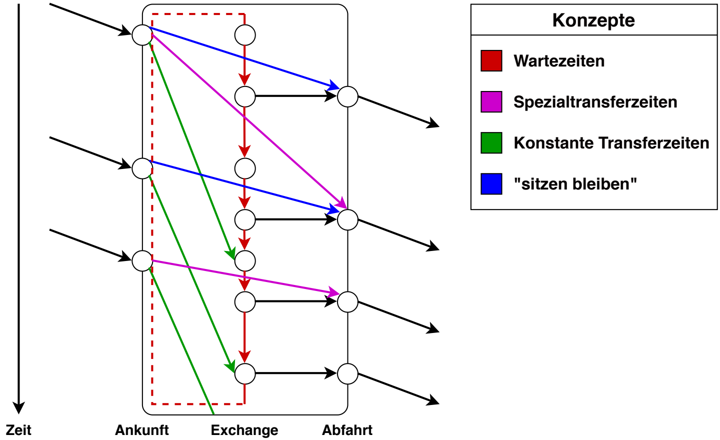
Größenordnungen

- Ein paar Zahlen im Jahr 2008 (**nur** Züge):

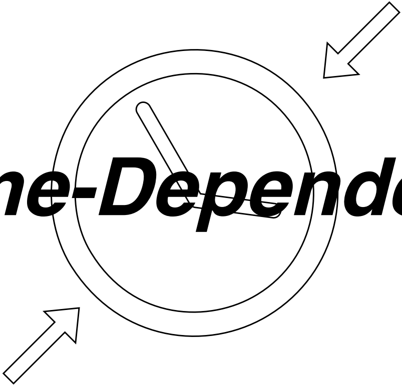
Anzahl an Kanten	
Zug	801.8 Tsd.
Weiterfahrt	733.7 Tsd.
Ankunft	796.7 Tsd.
Abfahrt	796.7 Tsd.
Warten (auf Exchange-Edge)	556.6 Tsd.
Besondere Umstiege	20.2 Tsd.
Gesamtanzahl	3705.7 Tsd.

Time-Expanded

Alle Konzepte auf einen Blick

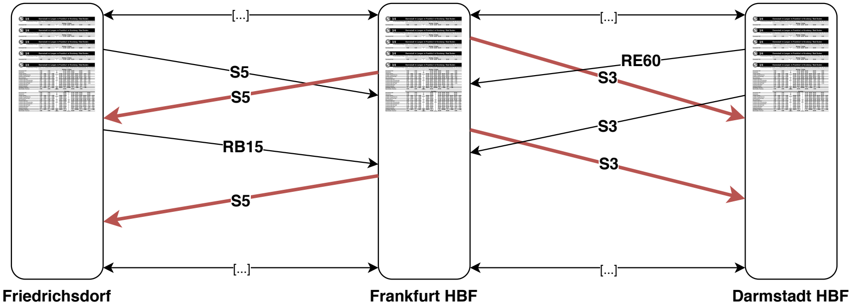


Time-Dependent



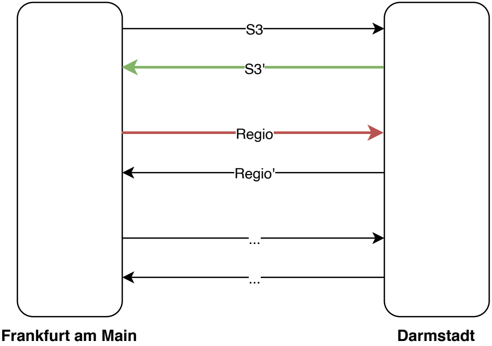
Das Time-Dependent Modell

- Denken wir zurück an das erste Beispiel...



Das Time-Dependent Modell

- Jetzt bauen wir das ganze etwas um...

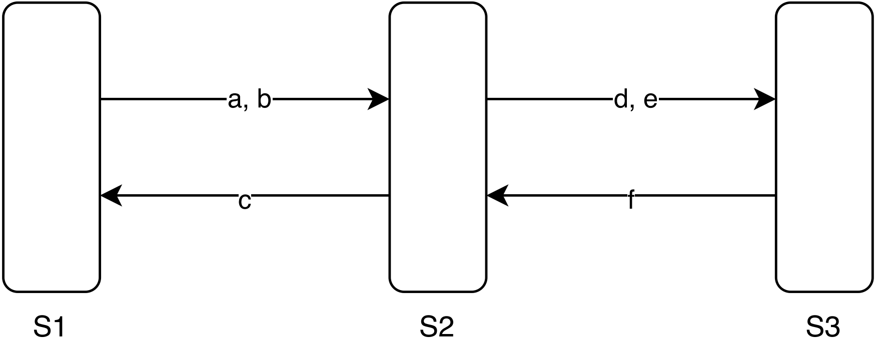


S3'
...
Abfahrt DA: 15:30
Ankunft FFM: 16:08
Abfahrt DA: 16:00
Ankunft FFM: 16:38
...

Regio
...
Abfahrt FFM: 15:20
Ankunft DA: 15:40
Abfahrt FFM: 15:50
Ankunft DA: 16:10
...

Das Time-Dependent Modell

- Oder etwas formeller:



Das Time-Dependent Modell

- Wir definieren für jede Kante (u, v) eine Funktion $f(t) : \mathcal{T} \to \mathcal{T}$.
  - $t \in \mathcal{T}$, $\mathcal{T} \triangleq$ Zeit.

Das Time-Dependent Modell

- Wir definieren für jede Kante (u, v) eine Funktion $f(t) : \mathcal{T} \to \mathcal{T}$.
  - $t \in \mathcal{T}, \mathcal{T} \triangleq$ Zeit.

- Dann ist unser Kantengewicht (*Reisezeit*):

$$travel\_time(t) = f_{(u,v)}(t) - t$$

Wie sieht so eine Funktion in der Realität aus?

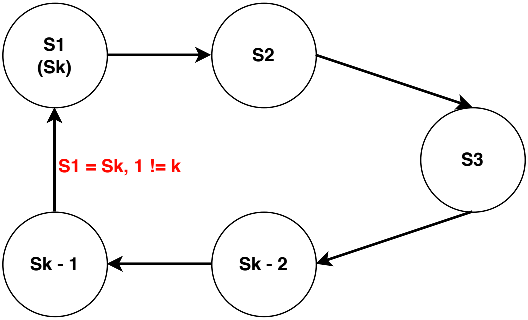
Das Time-Dependent Modell

Konstante Umstiegszeiten

- Für konstante Umstiegszeiten definieren wir Zugrouten:
  - Sei R eine Zugroute $S_0, S_1, ..., S_{k-1}, S_k$ für $k > 0$

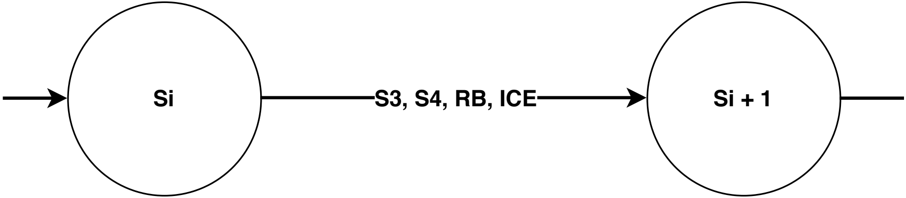
Das Time-Dependent Modell
Konstante Umstiegszeiten

- Für konstante Umstiegszeiten definieren wir Zugrouten:
  - Sei R eine Zugroute $S_0, S_1, ..., S_{k-1}, S_k$ für $k > 0$
  - Erlaubt: $S_i = S_j$, $i, j \in k$, für $i \neq j$ (Schleifen)!



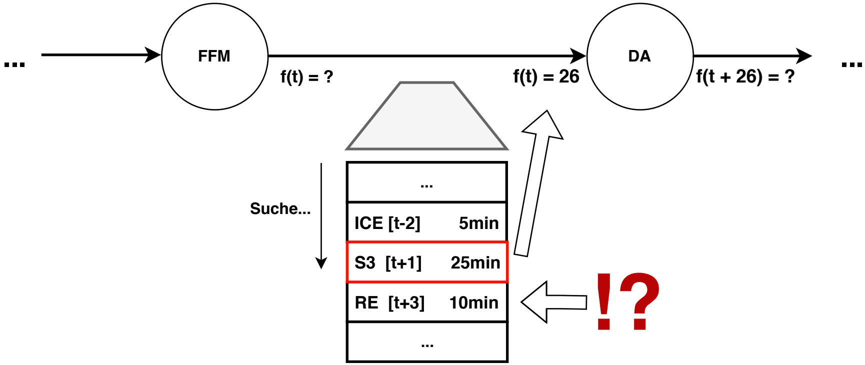
Das Time-Dependent Modell
Konstante Umstiegszeiten

- Jetze gruppieren wir alle Züge, die die gleiche Strecke fahren, in eine Zugroute
- **Was ist hier das Problem?**



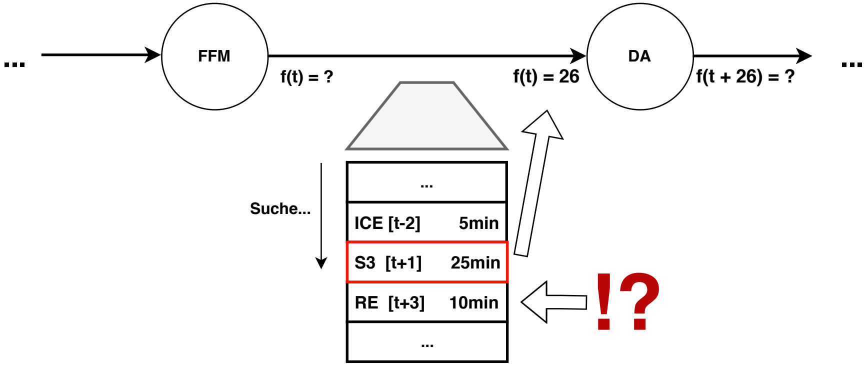
Das Time-Dependent Modell

Konstante Umstiegszeiten



Das Time-Dependent Modell

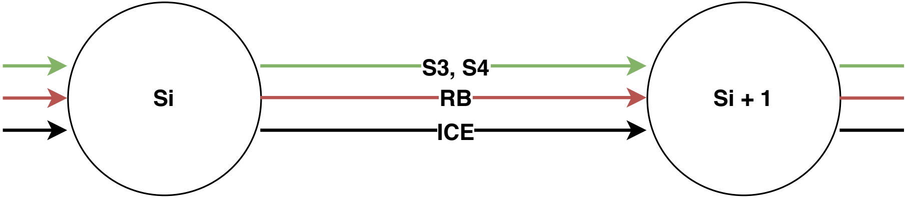
Konstante Umstiegszeiten



In welchen Fällen aber wäre es doch besser, die S3 zu nehmen?

Das Time-Dependent Modell
Konstante Umstiegszeiten

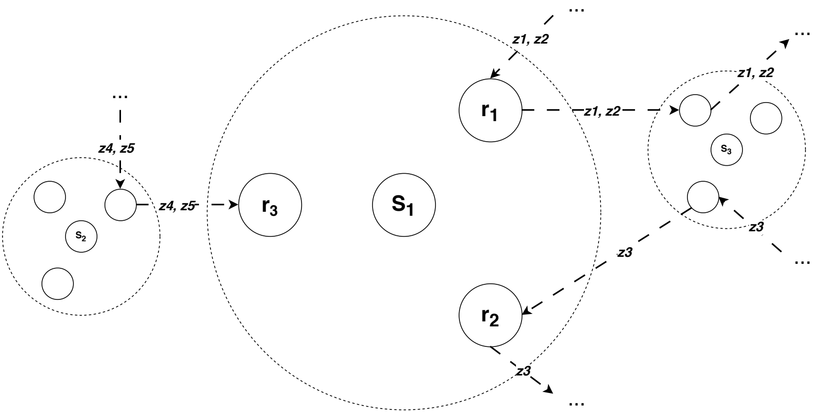
- Keine Züge z_1, z_2 dürfen S_i um t_1, t_2 $(t_1 \leq t_2)$ verlassen, und z_2 vor z_1 S_{i+1} erreichen!
- In diesem Fall spalten wir in einzelne Routen:



Das Time-Dependent Modell

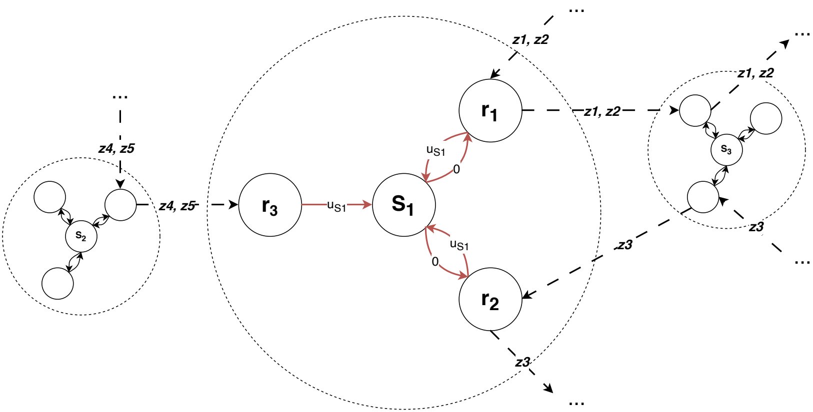
Konstante Umstiegszeiten

- Wir teilen eine Station in einen Stationsknoten *S* und Routenknoten r_i



Das Time-Dependent Modell
Konstante Umstiegszeiten

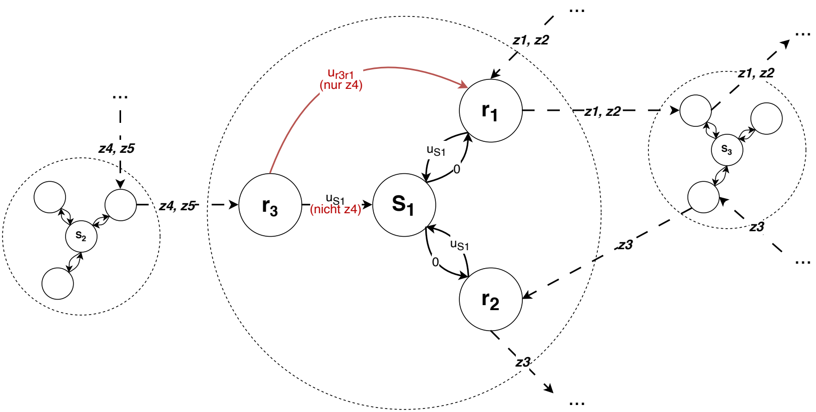
- Wir erstellen Transferkanten mit *ausgehenden* Transferkosten



Das Time-Dependent Modell

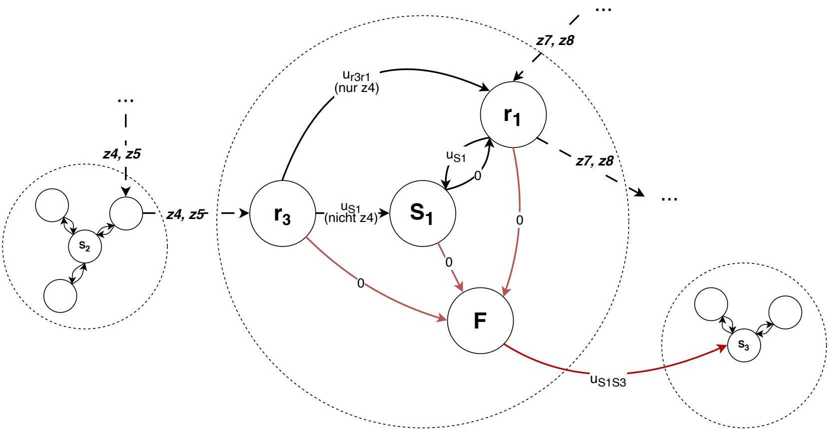
Variable Umstiegszeiten

- Wir erstellen spezielle Kanten und Regeln zwischen Knoten



Fußwege

- Fußwege sind immer abhängig von der Zeit, also einfach zu modellieren



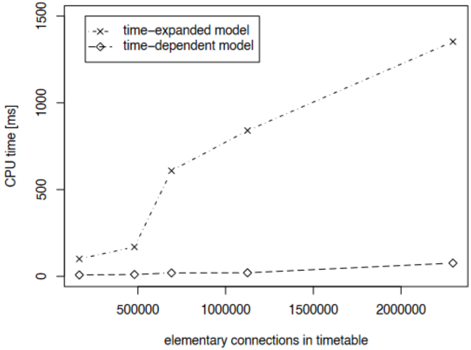
Größenordnungen

- Ein paar Zahlen im Jahr 2007 (**nur** Züge):
  - 56,994 Züge, 8916 Stationen

	Time Dependent	Time Expanded
Knoten	240 Tsd.	3479 Tsd.
Kanten	670 Tsd.	5633 Tsd.

Performanz

- TD ist besser für Single-Criteria Suche[2].



[2] Pyrga et al.: Experimental Comparison of Shortest Path Approaches for Timetable Information, 2004

Performanz

- Aber: Komplexität von TD wächst schnell mit mehr Kriteria und Regeln
- Also in realistischen Szenarien!
    - TD nur 58% schneller (in CPU-Zeit) als TE

Implementation in MOTIS
Graphenmodell

- Time-Expanded mit Verfeinerungen
  - Konstante und Variable Umstiegszeiten
  - Verkehrstage
  - Fußwege

Implementation in MOTIS
Kantengewichtungen

- Reisezeit ($t_{Ankunft} - t_{Abfahrt} \mod 1440$)
- Anzahl der Umstiege (Ankunfts- und Spezialkanten)
- Ticketpreise $\rightarrow$ Vortrag Spezialangebote

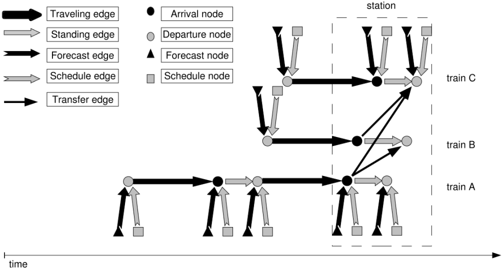
Implementation in MOTIS
Algorithmus

- Viele Algorithmusverfeinerungen und Spezialattribute
  - Thema des nächsten Vortrags!

Das dritte Graphenmodell

Es ist das dritte Graphenmodell mit einem Klappstuhl?!?!!

- In MOTIS gibt es noch ein drittes großes Graphenmodell: Den **Abhängigkeitsgraphen**
- Abhängigkeiten zwischen Zügen und Stationen
- Wichtig für **Verspätungen**!



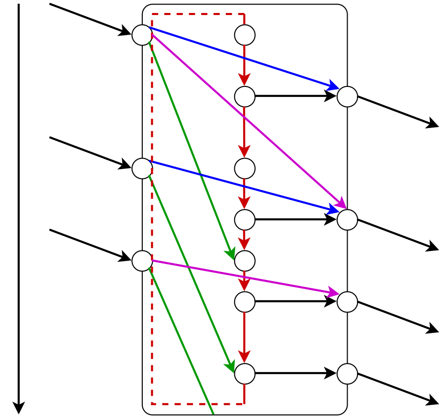
Zusammenfassung

Sachen zum Mitnehmen für die späteren Vorträge...

- Time-Expanded vs. Time-Dependent
  - Umstiegszeiten, Fußwege, Takt
  - In MOTIS: Time-Expanded
- Größenordnungen der Graphen unterscheiden sich stark
- Für realistische Anwendung: Jeweils unterschiedliche Verfeinerungen und Anpassungen notwendig

Time-Expanded

Nochmal zum Mitnehmen



Konzepte
Wartezeiten
Spezialtransferzeiten
Konstante Transferzeiten
"sitzen bleiben"