

# Algorithmische Entscheidungsunterstützung zur Trassenallokation

Ch. Eichenberger

IVT  
ETH Zurich

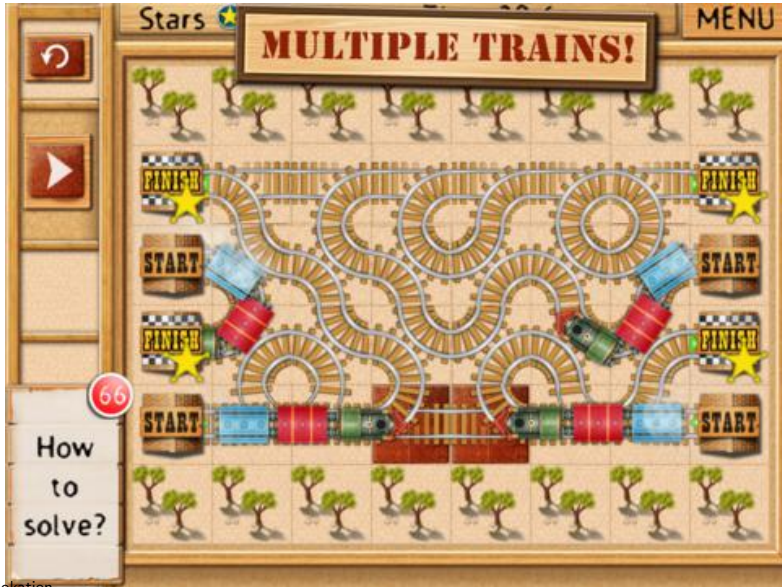
26. Februar 2016

 Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme  
Institute for Transport Planning and Systems

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

# Worum geht's?



Quelle: <https://itunes.apple.com/us/app/rail-maze-pro-hd/id475218064>

# Inhalt

---



1. Ausgangslage
2. Modell
3. Workflows
4. Trassengraph und Pruning
5. Multicommodity Flow Problem und zwei MIP-Formulierungen
6. Konklusion

# Inhalt

---

1. Ausgangslage
2. Modell
3. Workflows
4. Trassengraph und Pruning
5. Multicommodity Flow Problem und zwei MIP-Formulierungen
6. Konklusion

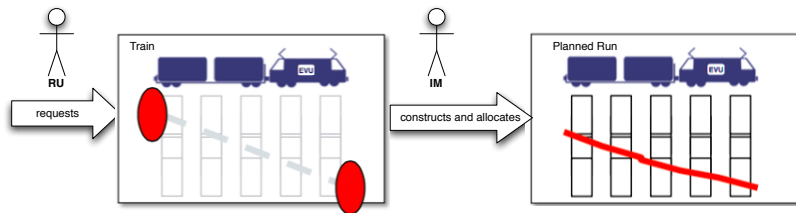
# Europäische Güterverkehrskorridore

	Korridor Rhine - Alpine	Korridor North Sea - Mittelmeer
Beteiligte Länder	NL, B, D, CH, I	NL, B, L, F, CH, (ab 2015 UK)
Mitglieder Verwaltungsrat	Prorail, Keyrail, Infrabel, DB-Netz, BLS, SBB, Trasse Schweiz, RFI	Prorail, Keyrail, Infrabel, CFL, ACF, RFF, SBB, Trasse Schweiz
Angeschlossene Terminals	6 Meereshäfen 10 grössere Inlandhäfen gut 100 Terminals	2 Meereshäfen 23 Terminals
In Basel die Grenze querende Güterzüge	~ 44'000 pro Jahr	~ 5'000 pro Jahr
Karte		

*EU-Verordnung 913/2010 zur Schaffung eines europäischen Schienennetzes für einen wettbewerbsfähigen Güterverkehr: die beiden Korridore mit Mitwirkung der Schweiz*

*Quelle: [Isenmann(2014)]*

# Organisatorische Trennung EVU und ISB

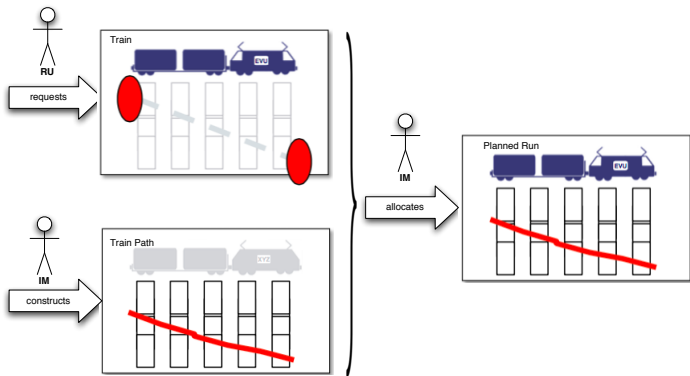


*Make-to-Order: Konstruktion und Zweisung von Trassen innerhalb der Bestellabwicklung*

*Quelle: Modifiziert nach [Weiß(2015)]*

- ▶ Schweiz: Im gleichen Konzern (SBB/BLS), aber Abwicklungsbehörde (Trasse Schweiz AG)
- ▶ Trennung von Trasse (ISB = Infrastrukturbetreiberin, IM = Infrastructure Manager) und Zug (EVU = Eisenbahnverkehrsunternemung, RU = Railway Undertaking)

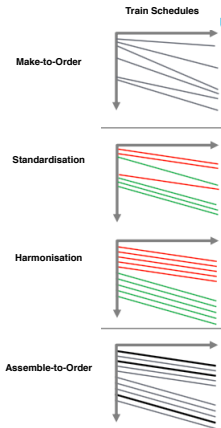
# Katalogtrassen: Konstruktion und Vergabe



*Assemble-to-Order: systematische Trennung von Konstruktion und Zuweisung von Trassen. Für den CH-Transit-Güterverkehr sind Korridortrassen (end-to-end) vorkonstruiert und reserviert.*

*Quelle: Modifiziert nach [Weiß(2015)]*

# Katalogtrassen: Standardi- und Harmonisierung



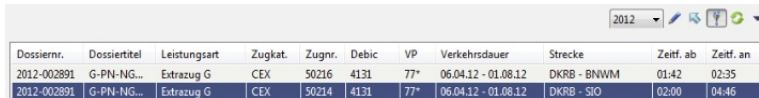
*Standardisierung und Harmonisierung von Trassen.*

*Quelle: Modifiziert nach [Weiß(2015)]*



# Tooling Güterverkehrs-Trassen

- + Fokus auf Bestellabwicklung zwischen EVU und ISB
- + Graphische Darstellung von Trassen/Fahrplanen (Weg-Zeit-Diagramm, Netzgraphik)
  - Manuelle Konstruktion, Expertenwissen
  - Suboptimale Ausnutzung der Infrastruktur? Unvollständige Standardisierung und Harmonisierung
  - Einzelkonstruktion, keine Just-in-Time-Produktion



Dossiernr.	Dossiertitel	Leistungsart	Zugkat.	Zugnr.	Debic	VP	Verkehrsdauer	Strecke	Zeitf. ab	Zeitf. an
2012-002891	G-PN-NG...	Extrazug G	CEX	50216	4131	77*	06.04.12 - 01.08.12	DKRB - BNWM	01:42	02:35
2012-002891	G-PN-NG...	Extrazug G	CEX	50214	4131	77*	06.04.12 - 01.08.12	DKRB - SIO	02:00	04:46

*Screenshot NeTS (= Netzweites Trassen-System): mehrere Bestellpositionen*

*Quelle: [Bucher(2014)]*

# Ziele der DAS-Arbeit

---

- ▶ mathematische Modellformulierung
- ▶ Implementation, mit der das Trassenzuweisungsproblem gelöst werden kann oder bei Unlösbarkeit die Quelle lokalisiert werden kann
- ▶ Verifikation der Implementation gegen Echtdaten
- ▶ Aussage über Anwendbarkeit auf grosse Modelle

# Inhalt

---

1. Ausgangslage
2. Modell
3. Workflows
4. Trassengraph und Pruning
5. Multicommodity Flow Problem und zwei MIP-Formulierungen
6. Konklusion

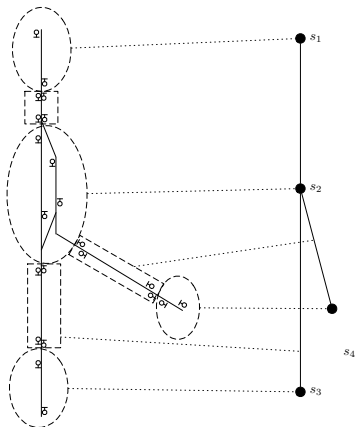
# Modellierung: Übersicht

---

- ▶ Makroskopische Topologie: Systemknoten, Trassenabschnitte
- ▶ Trassenkatalog und Trassenantrag, Service Level
- ▶ Periodizität
- ▶ Optimierungsproblem, Kostenfunktion

# Makroskopische Topologie

---



*Links: Elemente der mikroskopischen Topologie, rechts: aggregierende Systemknoten und Trassenabschnitte*

*Quelle: Eigene Darstellung*

# Trassenkatalog und Trassenantrag, Service Level

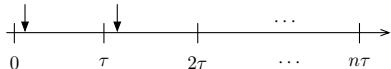
---

**Trasse** Katalogtrasse; per Konstruktion paarweise konfliktfrei  
(vorbehältlich mikroskopischer Verifikation in  
Knoten)

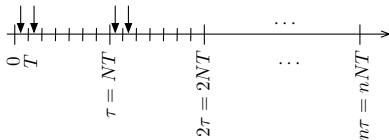
**Trassenkatalog** Liste der vorkonstruierte Katalogtrassen als  
kommerzielles Angebot der ISB

**Trassenantrag** EVU möchte *von – nach* fahren, wöchentlich *ab*  
und *an*, maximal *früher* und *später*

# Periodizität



Einfache periodische Trassenallokation (ohne Periodizität)



Periodische Trassenallokation mit Periodizität

*Periodische Trassenallokation: ohne und mit Periodizität (Verkehrstage)*

*Quelle: Eigene Darstellung*

Flache Trassenallokation jeden Verkehrstag der Periodizität als einzelnen einfachen periodischen Antrag behandeln

# Optimierungsproblem, Kostenfunktion

---

## Lineare Kostenfunktion

$$c_p^k = \underbrace{\Delta_{\tau}^{-}(\delta_{v_1}, \delta_k, \alpha_k)}_{\text{Verfrühung}} + \underbrace{(\alpha_{v_n} \ominus_{\tau} \delta_{v_1})}_{\text{Reisezeit}} + \underbrace{\Delta_{\tau}^{+}(\alpha_{v_n}, \delta_k, \alpha_k)}_{\text{Verspätung}}. \quad (1)$$

(nicht-lineare Funktionen möglich, z.B. exponentielle Kosten für Verfrühung/Verspätung gegenüber beantragten Zeiten).

## Optimierungsproblem

$$\min_{\mathcal{M} \in \text{Sol}(\pi)} \sum_{k \in K} c(p_{\mathcal{M}}(k)), \quad (2)$$

wobei  $c(p_{\mathcal{M}}(k))$  die Kosten von  $k$  in der zulässigen Allokation  $\mathcal{M}$  sind.

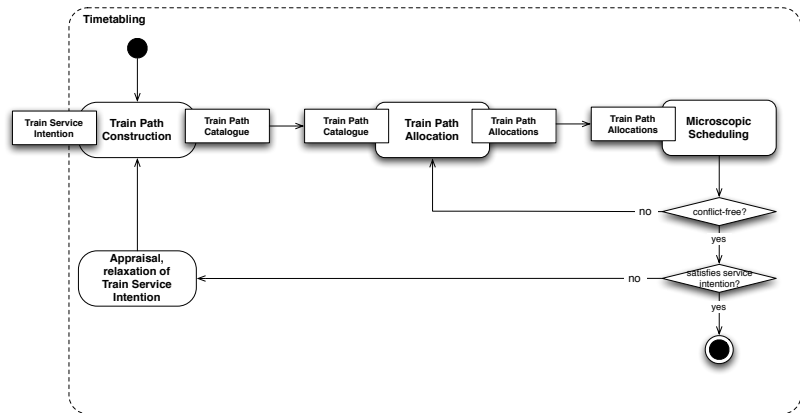


# Inhalt

---

1. Ausgangslage
2. Modell
3. Workflows
4. Trassengraph und Pruning
5. Multicommodity Flow Problem und zwei MIP-Formulierungen
6. Konklusion

# Trassenallokation in der Fahrplanerstellung GV I



*Iterativer Top-Down-Ansatz Fahrplanerstellung GV: Vom Betriebsprogramm über Trassenkatalog und Trassenzuweisung bis zu mikroskopischer Planung/Verifikation (Systemknoten)*

*Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Ideen von [Caimi(2009)]*

# Trassenallokation in der Fahrplanerstellung GV II

---

## Interpretationen

organisatorisch Black-Box für Fahrplanplaner

dekompositorisch iterative Trassenvergabe

kommerziell freie Kapazität; Just-in-Time-Vergabe

# Inhalt

---

1. Ausgangslage
2. Modell
3. Workflows
- 4. Trassengraph und Pruning**
5. Multicommodity Flow Problem und zwei MIP-Formulierungen
6. Konklusion

# Pruning

---

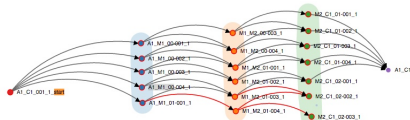
## Idee

Lösungsraum einschränken (engl. “to prune” = dt. “stutzen”), damit das Problem *rechentechnisch handhabbar* bleibt:

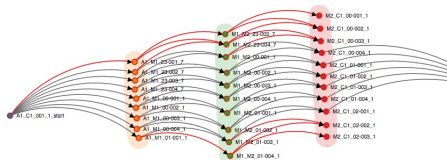
- ▶ Zeitfenster Abfahrt
- ▶ Zeitfenster Ankunft
- ▶ dynamisches Zeitfenster Aufenthaltszeiten
- ▶ Ausschluss von Systemknoten

# Trassengraph

Pro Trassenantrag ein gerichteter, azyklischer Graph (DAG = Directed Acyclic Graph):



ohne Verfrühung



mit Verfrühung

*Gerichtete, azyklische Trassengraphen mit unterschiedlichem Pruning. Rot: gerichtete Kanten, die wegen Verletzung einer Pruning-Bedingung während der Konstruktion wieder aus dem Graphen gelöscht werden.*

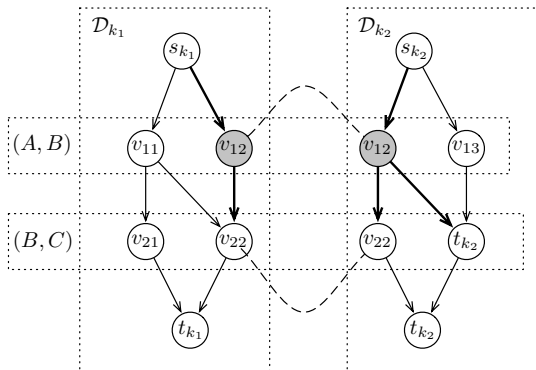
*Quelle: Eigene Darstellung*

# Inhalt

---

1. Ausgangslage
2. Modell
3. Workflows
4. Trassengraph und Pruning
5. Multicommodity Flow Problem und zwei MIP-Formulierungen
6. Konklusion

# Multicommodity Flow Problem



*Beispiel für Multicommodity Flow: für jeden Antrag  $k$  muss es genau einen Pfad ("flow") von  $s_k$  nach  $t_k$  gehen, sodass jede Trasse höchstens einmal gebraucht wird. Knoten derselben Trasse in verschiedenen Graphen  $\mathcal{D}_k$  sind mit gestrichelten Linien verbunden.*

*Quelle: Eigene Darstellung*



# Arc-Node Formulation

---

## Variablen

$$x_a^k = \begin{cases} 1 & \text{if } k \text{ uses } a, \\ 0 & \text{else.} \end{cases}, \quad \forall k \in K, \quad \forall a \in A_k, \quad (3)$$

## Zielfunktion

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{a \in A_k} c_a^k x_a^k \quad (4)$$

## Bedingungen

$$\sum_{k \in K} \sum_{w \in \delta_k^+(v)} x_{(v,w)}^k \leq 1, \quad \forall v \in \bigcup_{k \in K} V_k, \quad (5)$$

$$\sum_{w \in \delta_k^+(v)} x_{(v,w)}^k - \sum_{u \in \delta_k^-(v)} x_{(u,v)}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } v = s_k, \\ -1 & \text{if } v = t_k, \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \quad \forall k \in K, \quad \forall v \in V_k, \quad (6)$$

$$x_a^k \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A_k, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

# Path-Based Formulation

---

## Variablen

$$y_p^k = \begin{cases} 1 & \text{if } k \text{ chooses } p \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \quad \forall k \in K, \quad \forall p \in P(k). \quad (8)$$

## Zielfunktion

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{p \in P(k)} c_p^k \cdot y_p^k \quad (9)$$

## Bedingungen

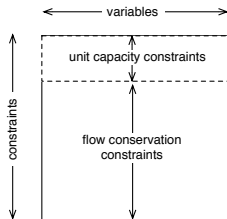
$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P(k): v \in V(p)} y_p^k \leq 1, \quad \forall v \in \bigcup_{k \in K} V_k \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P(k)} y_p^k = 1, \quad \forall k \in K, \quad \forall p \in P(k), \quad (11)$$

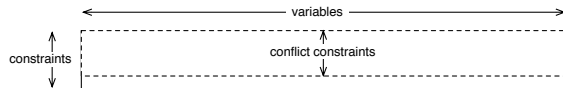
$$y_p^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \quad \forall p \in P(k). \quad (12)$$

# Rechentechische Ergebnisse

---



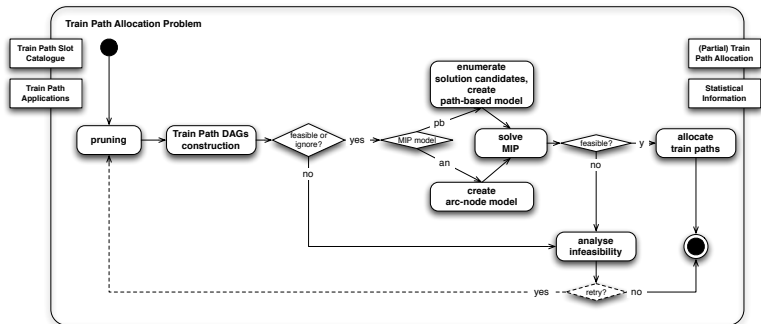
arc-node model



path-based model

*Für grosse Modelle kann die Aufzählung aller Pfade auch bei "gutem" Pruning zu einem Problem werden (sowohl zeitlich, als auch speichertechnisch).*

# Ablauf



*Halbautomatischer Workflow für das Trassenzuweisungsproblem. Die gestrichelten Schritte sind (noch) nicht implementiert und müssen durch einen Operations-Research-Spezialisten durchgeführt werden.*

*Quelle: Eigene Darstellung*

# Inhalt

---

1. Ausgangslage
2. Modell
3. Workflows
4. Trassengraph und Pruning
5. Multicommodity Flow Problem und zwei MIP-Formulierungen
6. Konklusion

# Konklusion

---

## Erreicht

- ✓ mathematische Modellformulierung
- ✓ Implementation, mit der das Trassenzuweisungsproblem gelöst werden kann oder bei Unlösbarkeit die Quelle lokalisiert werden kann
- ✓ Verifikation der Implementation gegen Echtdaten
- ✓ Aussage über Anwendbarkeit auf grosse Modelle

## Weitere Forschung

- Weitere Kostenfunktionen betrachten
- Iterativen Ansatz bei Unlösbarkeit weiterentwickeln
- Pfad-basierten Ansatz weiterentwickeln
- Implementation nicht-simple Periodizität
- Schnittstelle zu mikroskopischer Planung/Verifikation



# Danke für die Aufmerksamkeit. Fragen?

---



# Referenzen I

---

-  Bucher, T. (2014) *NeTS-AVIS Tagesfahrplan BV4b Handbuch Besteller Version i41*, Schweizerische Bundesbahnen SBB AG.  
[https://www.sbb.ch/content/sbb/de/desktop/sbb-konzern/sbb-als-geschaeftpartner/zugang-zum-bahn-netz/onestopshop/systeme/nets/\\_jcr\\_content/relatedPar/relateddownloadlist/downloadList/benutzerhandbuch\\_.spooler.download.pdf](https://www.sbb.ch/content/sbb/de/desktop/sbb-konzern/sbb-als-geschaeftpartner/zugang-zum-bahn-netz/onestopshop/systeme/nets/_jcr_content/relatedPar/relateddownloadlist/downloadList/benutzerhandbuch_.spooler.download.pdf), accessed 2015/11/02.
-  Caimi, G. C. (2009) Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilised railway network, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 18581, 2009.



## Referenzen II

---

-  Isenmann, T. (2014) *Die Europäischen Güterverkehrskorridore*, Generalversammlung VöV. <http://www.voev.ch/de/index.php?section=downloads&download=7318>, accessed 2016/02/22.
-  Weiß, R. (2015) *Industrialisierte Kapazitätsoptimierung mit einem vorkonstruierten Trassenkatalog*, DB Netz AG, <http://www.it15rail.ch/>, accessed 2016/02/26.