

# Digitalisierung in der Fahrplanplanung

Stefan Unterberger  
Ambra Toletti

I-FUB-KOP-SRO  
16. November 2022



## Wir sind:



Stefan Unterberger

Leiter Stabilität und  
Robustheit  
SBB Infrastruktur



Dr. Ambra Toletti

Business Analystin  
SBB IT  
(bis 10/2022)



Michael Mann

Projektleiter  
Grundlagen  
Fahrplanplanung  
SBB Infrastruktur



Melissa White

Product Ownerin  
SBB Infrastruktur



Thomas Wieland

Projektleiter  
Grundlagen  
Fahrplanplanung  
SBB Infrastruktur

# Unsere Herausforderungen.



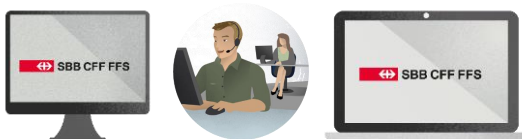
Gesamtsystemkosten der Bahn steigen



rasche Veränderungen der Mobilitätsbedürfnisse im Gütertransport, Pendler- und Freizeitverkehr



Intermodaler Wettbewerb steigt – dank umweltsensitiver Bevölkerung Bahn im Vorteil



**neue Technologien bieten Chancen**

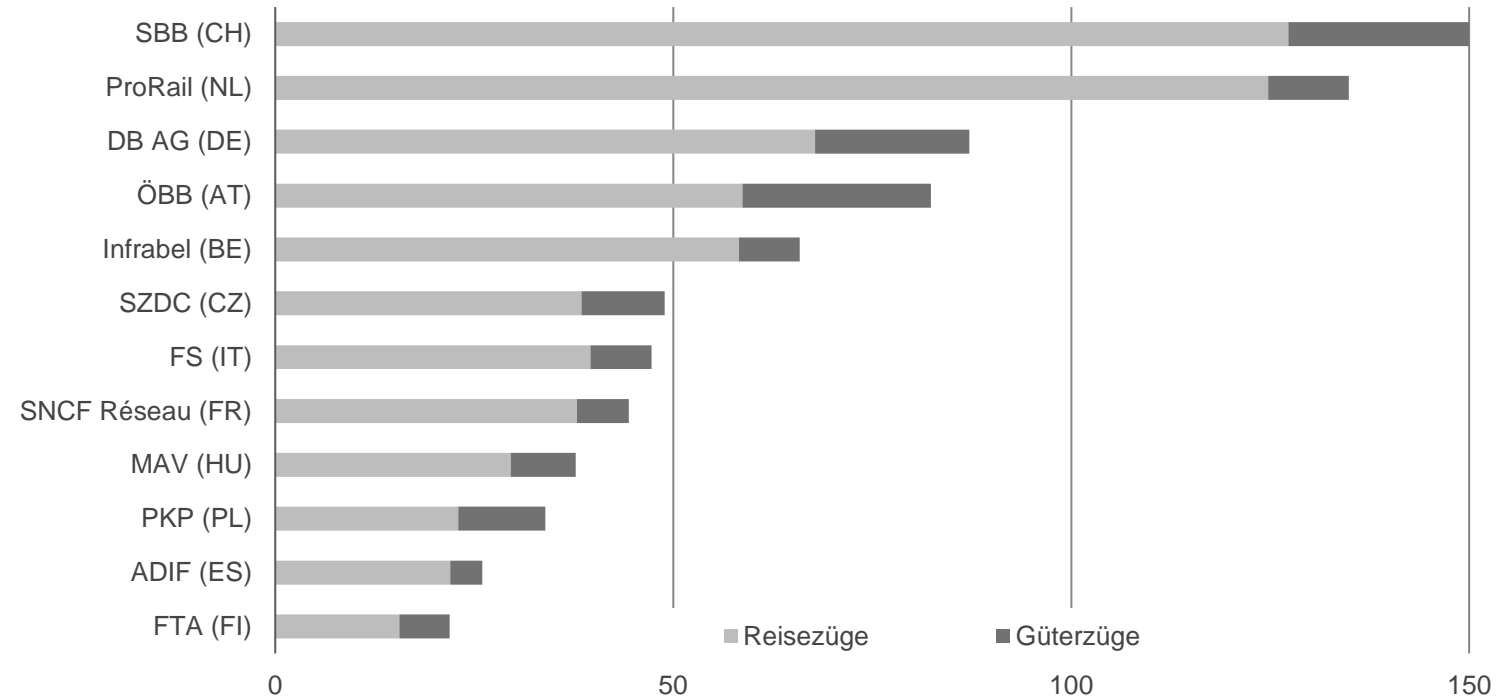


...aber wenn...

# Streckennetzbelastung in Europa im 2020. Die Schweiz an der Spitze.

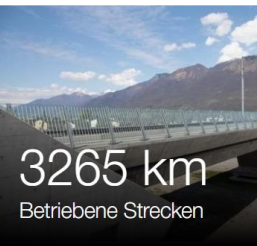
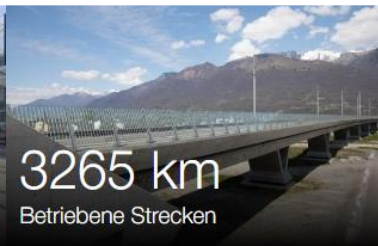


Durchschnittliche Anzahl Züge pro Strecke und Tag auf der Eisenbahninfrastruktur.



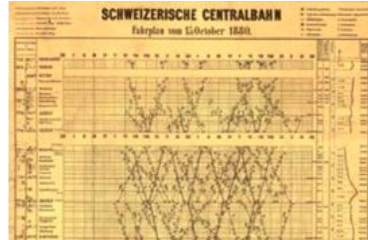
Zugdichte

Quellen: UIC, ProRail, SNCF, reporting.sbb.ch



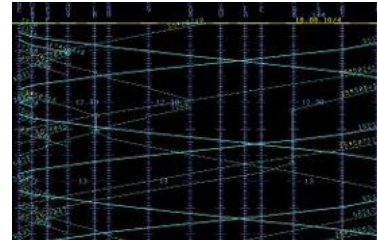
# Nach 150 Jahren auf dem Weg vom gezeichneten zum gerechneten Fahrplan.

Papier & Bleistift



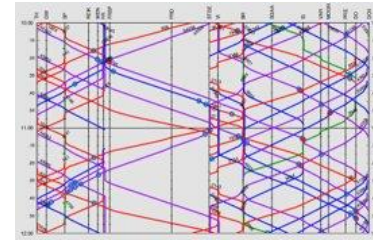
1847

Syfa



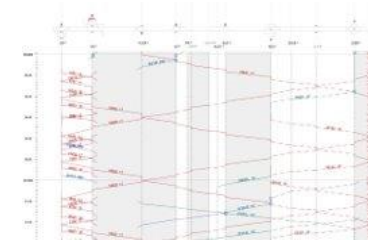
1988

Viriato



2005

NeTS



2007

TMS



2020 2022

Zugfahrten werden **manuell** von **Experten** geplant. Das **Planungswissen** ist in den **Köpfen der Planenden**. Die **nächste Generation Planungssysteme beherrscht die automatisierte Planung** und hilft uns die nächste Stufe in der Planungsqualität zu erreichen.

**Kundenzufriedenheit, Pünktlichkeit** und **Effizienz** verbessern:

- Kapazitätsnutzung steigern
- Anschlüsse planen
- EVU bekommen rascher ein passendes Trassenangebot
- realitätsnahem Kapazitätsplan
- ausgeplanten Baustellen
- zuverlässigere und konsistente Kundeninformation

Als Auftraggeberin erhalte ich ein durchgängiges System das von der «groben Mittelfristplanung» bis zur «mikroskopischen Tagesplanung» geht.

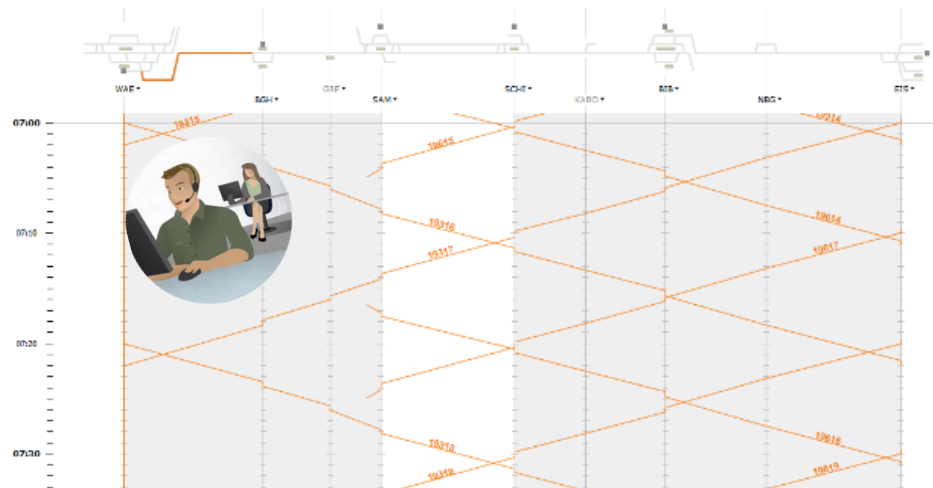
Ich freue mich, dass wir im öffentlichen Verkehr verlässlicher werden.

Rea, Trassenvergabestelle TVS



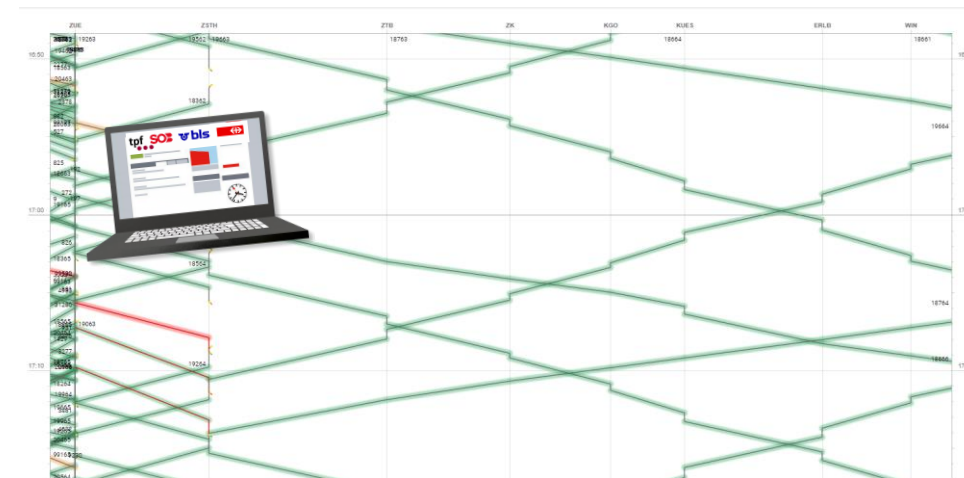
# Flexibilität im Fahrplan erhöhen. Innovationspotentiale umsetzen und Kapazität optimal ausnutzen.

## Kapazitätsplanung heute



- **keine Konflikterkennung**
- viel regionales Know-How in den **Köpfen der Planenden**
- eine **grosse Anzahl (700)** an planungsrelevanten Vorgaben
- Variantenplanung und -bildung sehr aufwändig

## Ambition in der Zukunft



- Automatische Berechnung von **konfliktfreiem Fahrplan**
- einfaches **Bilden von Varianten**
- **Spielräume** nutzen
- Dank Kapazitätsbänder und **flexibler Nutzung von Reserven** stabiles Angebot

# Innovation? Digitalisierung nicht zum Selbstzweck!

Als Reisender profitiere ich von verlässlicheren Transportketten.



Als Kapazitätsplanerin kann ich rascher auf geänderte Wünsche der EVU reagieren.



Einflussfaktoren wie Rangierungen und Intervalle sind im Kapazitätsplan berücksichtigt.



Als Kunden- begleiterin erhalte ich stets aktuelle und konsistente Kundeninformationen.



Als Planerin EVU erhalte ich rasch verlässliche und attraktive Trassenangebote.



In der Bahnproduktion können wir Fahrplanvarianten vergleichen und bewerten.



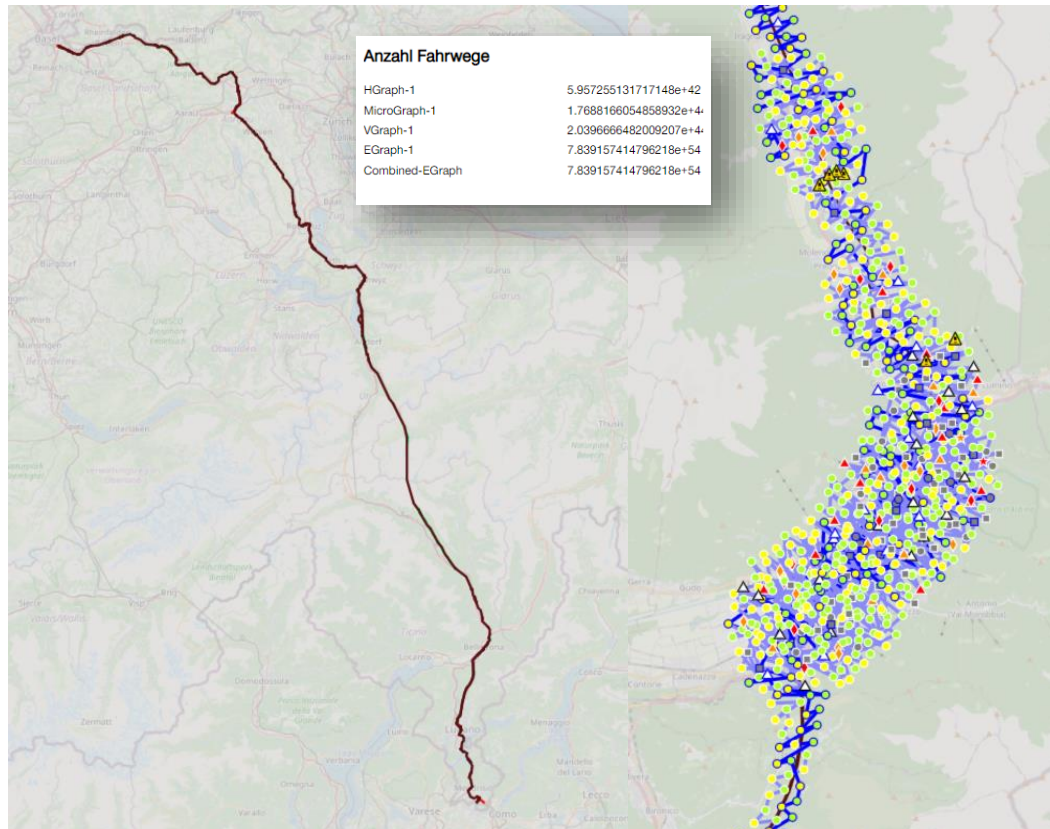
«Die Vorteile der Maschine nutzen. Das Varianten-Denken der Mitarbeitenden stärken: Die Fahrplanplanung bleibt ein Kunsthandwerk.»  
Stefan Unterberger, Leiter SRO





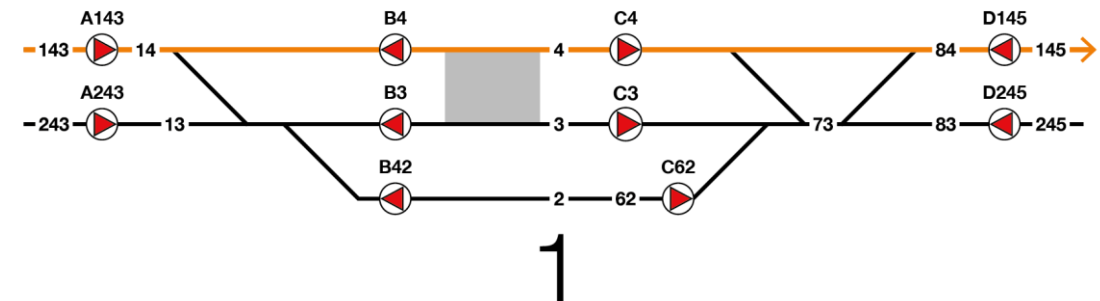
# Eine Herausforderung bei der Berechnung eines Extrazuges

Ab einer gewissen Grösse des Planungsgebiet führen die viele Fahrwegalternativen zu einer Problemkomplexität, die nicht mehr in nützlicher Zeit gelöst werden kann. Entsprechend kann bisher weltweit noch keine Eisenbahn landesweit automatisiert einen Fahrplan erzeugen.

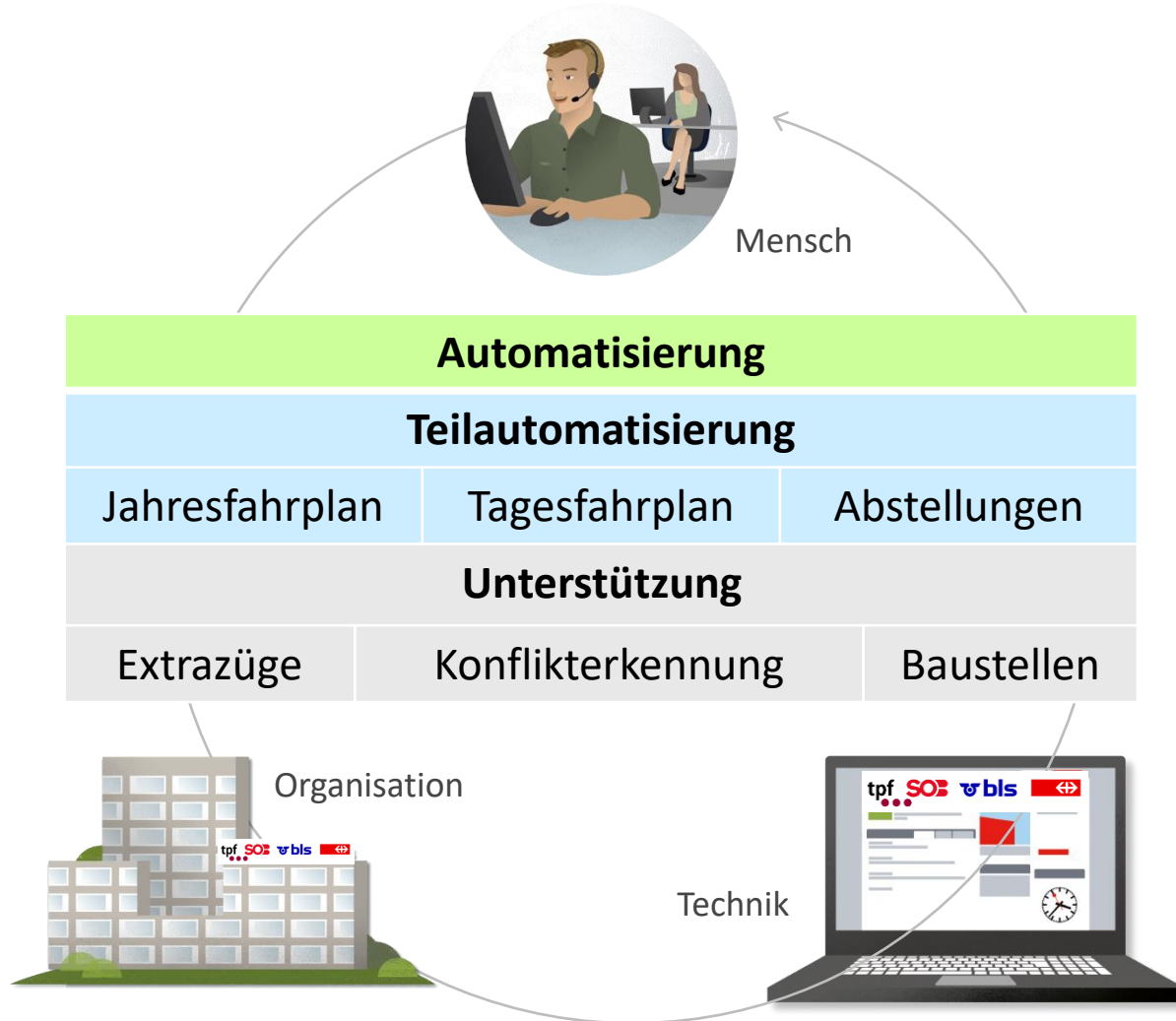


Ein Güterzug von Basel Rangierbahnhof nach Chiasso Simistamento hat theoretisch  $10^{54}$  mögliche Fahrwege.

**Herausforderung:**  
Lösung muss für die ganze Schweiz skalieren.



# Die Lerntreppe führt zum nachhaltigen Erfolg. Risikominimierung, in dem Nutzen schrittweise in Produktion geht.



Der Umfang des geplanten Paradigmen-Wechsels beeinflusst die Roadmap und muss von Stakeholdern (ISB und EVU) akzeptiert werden. Beispiele:

- Konsequente Trennung Trasse / Zug
- Konfliktfreie versus konfliktbehaftete Fahrpläne
- Bestellung gemäss TTR Prozess gemäss TTT Standard
- Gibt es keine Imprime mehr? Auch nicht für EVU?
- Gibt es keine schriftlichen Anordnungen mehr?
- Gibt es keine Vernehmlassung-Funktion für I+EVU?
- Gibt es keine übergreifende Dossierverwaltung für EVU?
- Erledigt Planungs-Tool keine KI -Transfer-Aufgaben für EVU?

Als Kapazitätsplanerin teile ich gerne mein Planungswissen und leiste als Business-Vertreterin gerne meinen Beitrag zum Erfolg von TMS.  
Melissa, Planerin Ersatzkonzepte

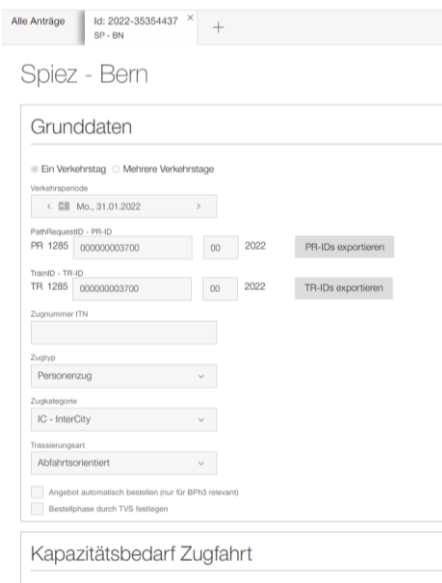


# Wo stehen wir im Herbst 2022: Bestellungen Extrazüge aus NeTS-AVIS in TMS planen



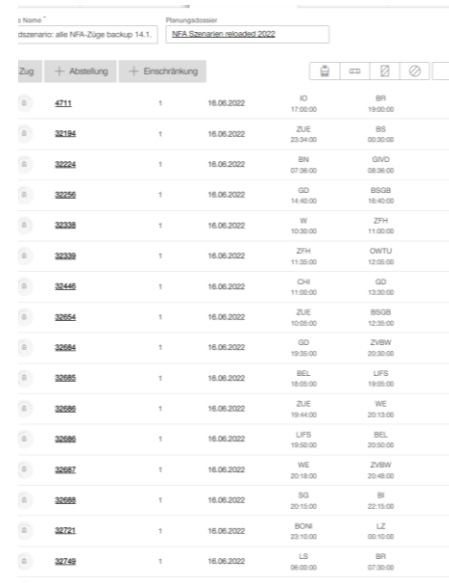
EVU erfasst Bestellung in NETS-AVIS.

NeTS-AVIS  
Bestellung EVU



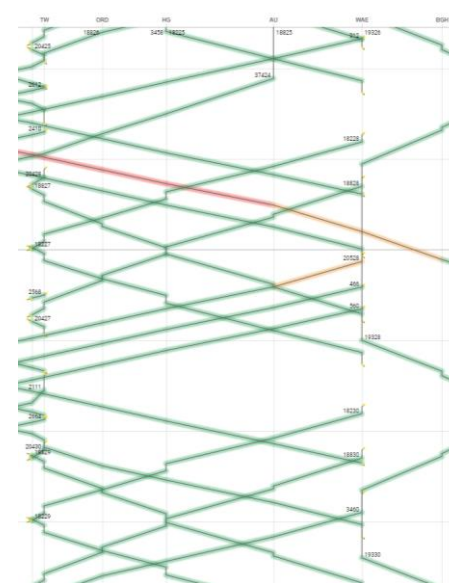
Übernahme der Bestellpositionen nach TMS-COP. Automatische Weiterleitung nach TMS-CP.

Nach TMS übernehmen



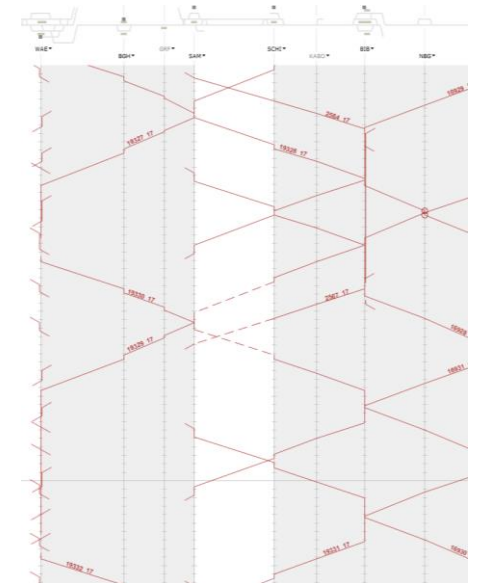
Aufbereitung vom Planungsauftrag inklusive Planungskontext.

Planungsauftrag aufbereiten



Berechnung der Lösung. Beurteilung und Entscheidung Export nach NeTS.

TMS Lösungssuche



Automatischer Export der Lösung nach NeTS.

NeTS-PLAN Export



Du möchtest gerne selber einen Zug planen?

Während dem Apéro im Bellavista bieten dir unsere Spezialisten die Gelegenheit dazu.



Michael Mann



Melissa White



Thomas Wieland

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$i^2 = -1$$

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

$$F - E + V = 2$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$E = mc^2$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} \approx 0$$

«Challenge angenommen. Business-Anforderungen im Algorithmus übersetzen.»

Dr. Ambra Toletti, Business Analystin TMS

# Solver: Grundrezept

## 1 Lösungsraum

= mathematische Darstellung aller Regeln, die eine gültige Lösung erfüllen muss.

## 1 (oder mehrere) Zielfunktion(en)

= mathematische Darstellung eines (oder mehrerer) Wunschmerkmal(e) der Lösung.

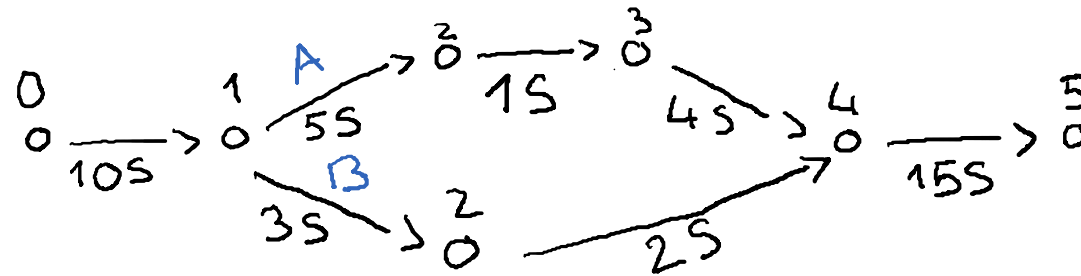
## 1 Engine

= Stück Software, das aus der mathematischen Darstellungen eine Lösung findet.

# Mixed Integer Linear Programming, GUROBI

Der Lösungsraum wird durch Variablen, Gleichungen und Ungleichungen definiert, z.B.

Fahrweggraph:



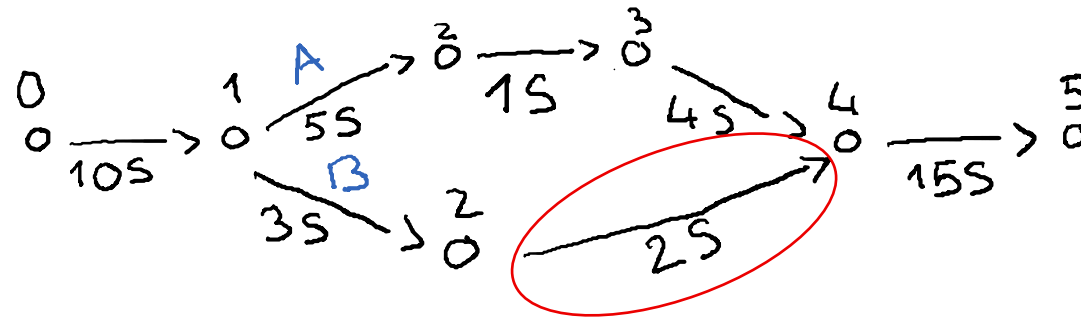
Was ist das?

$$t_4 - t_2 + M(1 - f_B) \geq 2$$

# Mixed Integer Linear Programming, GUROBI

Der Lösungsraum wird durch Variablen, Gleichungen und Ungleichungen definiert, z.B.

Fahrweggraph:



Minimale Fahrzeit:

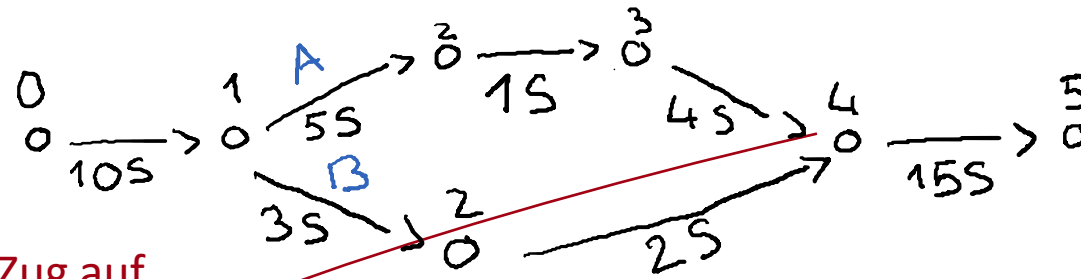
$$t_4 - t_2 + M(1 - f_B) \geq 2$$



# Mixed Integer Linear Programming, GUROBI

Der Lösungsraum wird durch Variablen, Gleichungen und Ungleichungen definiert, z.B.

Fahrweggraph:



Zeitvariablen: Wann ist der Zug auf Knoten 2 bzw. 4 des Fahrwegs

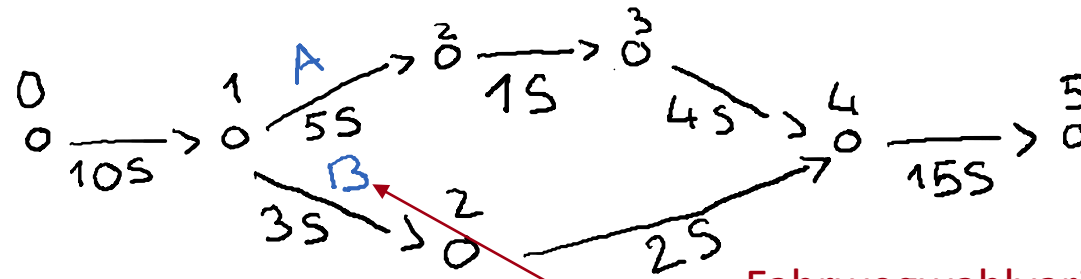
Minimale Fahrzeit:

$$t_4 - t_2 + M(1 - f_B) \geq 2$$

# Mixed Integer Linear Programming, GUROBI

Der Lösungsraum wird durch Variablen, Gleichungen und Ungleichungen definiert, z.B.

Fahrweggraph:



Fahrwegwahlvariable: Benutzt der Zug den Fahrweg B?

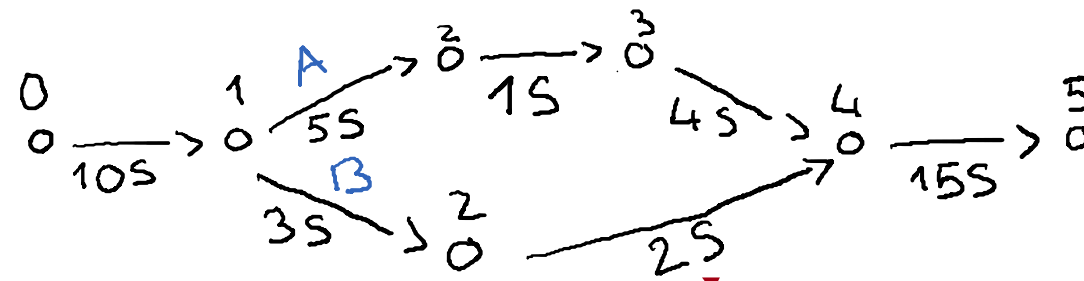
Minimale Fahrzeit:

$$t_4 - t_2 + M(1 - f_B) \geq 2$$

# Mixed Integer Linear Programming, GUROBI

Der Lösungsraum wird durch Variablen, Gleichungen und Ungleichungen definiert, z.B.

Fahrweggraph:



Minimale Fahrzeit der Kante

Minimale Fahrzeit:

$$t_4 - t_2 + M(1 - f_B) \geq 2$$

M: Grosse Zahl

# Mixed Integer Linear Programming, GUROBI

## Variablen:

t: Zeit, wann der Zug an einem bestimmten Punkt ist.

f: Fahrwegwahl (wo es mehrere Möglichkeiten gibt).

d: Verspätung eines CapacityDemandEvent.

p: Reihenfolge von Zügen auf gemeinsamen Ressourcen.

Hilfsvariablen: Zeit der Belegung und Freigabe jeder Ressource.

## Gleichungen und Ungleichungen:

Minimale Fahrzeit: Für jede Kante des Fahrweggraphs.

Fahrweg "Flow": Konsistente Wahl der Kanten.

Konfliktvermeidung: Für jedes Zugpaar auf gemeinsamen Ressourcen.

Früheste Zeit: Für Knoten von CapacityDemandEvents.

Späteste Zeit: Für Knoten von CapacityDemandEvents (Verknüpfung mit Verspätungsvariablen).

Hilfsbedingungen: z.B. Minimale Fahrzeit Cuts (siehe später).

# Mixed Integer Linear Programming, GUROBI

Die Zielfunktionen sind

1. Die Summe aller Verspätungsvariablen (d.h. Verspätungsminimierung).

$$\min \sum_{cd\_events} d_{cd\_event}$$

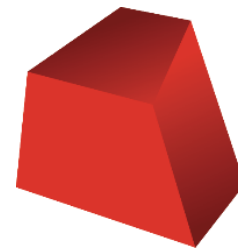
2. Die Summe der "Zeitverschwendungen" von Extrazügen.
3. Die Summe aller "Penalties" der ausgewählten Fahrwege.

# Mixed Integer Linear Programming, GUROBI

Die Engine ist GUROBI.

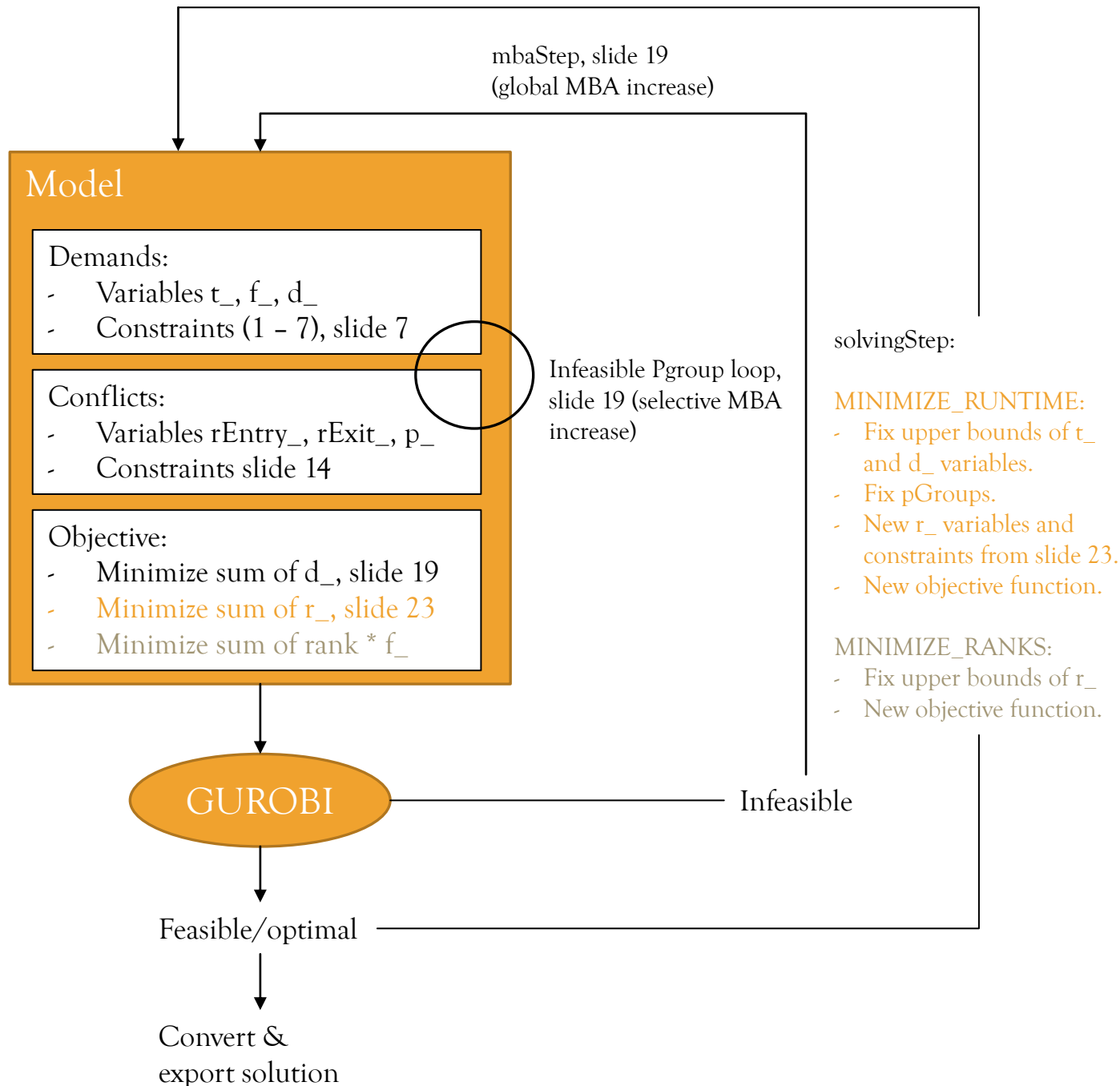
Commercial Product

Gurobi Optimization, LLC



**GUROBI**  
OPTIMIZATION

# Loops und Performance



- ◇ Das Erzeugen des Modells und das Berechnen von Lösungen ist sehr kompliziert.
- ◇ Loops und Vereinfachungen zur Steigerung der Performance wurden entwickelt (siehe Beispiel links).
- ◇ Neue Anforderungen werden ständig integriert.
- ◇ Die Performance wird ständig geprüft und verbessert.
- ◇ Nicht vergessen: Das Problem ist NP!

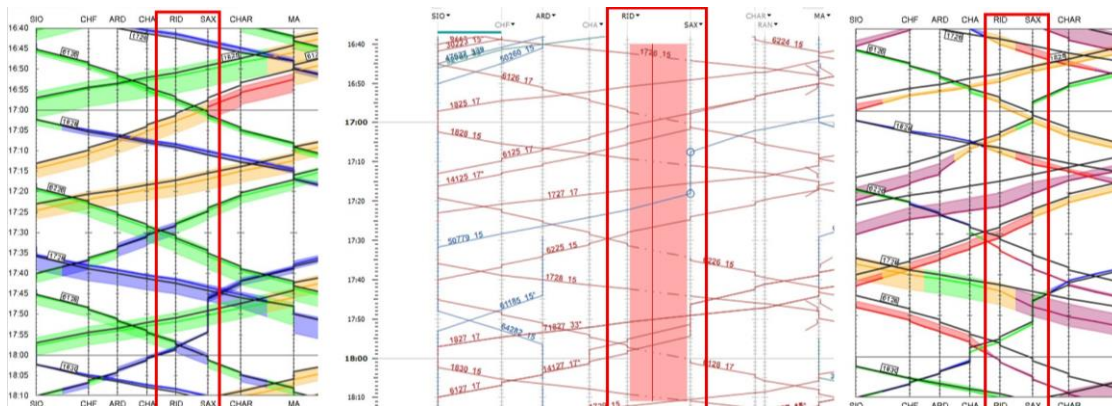


Fragen?



# Systematische Konflikterkennung soll den Mitarbeitenden in der Planung unterstützen.

## NeTS (Master-System heute)

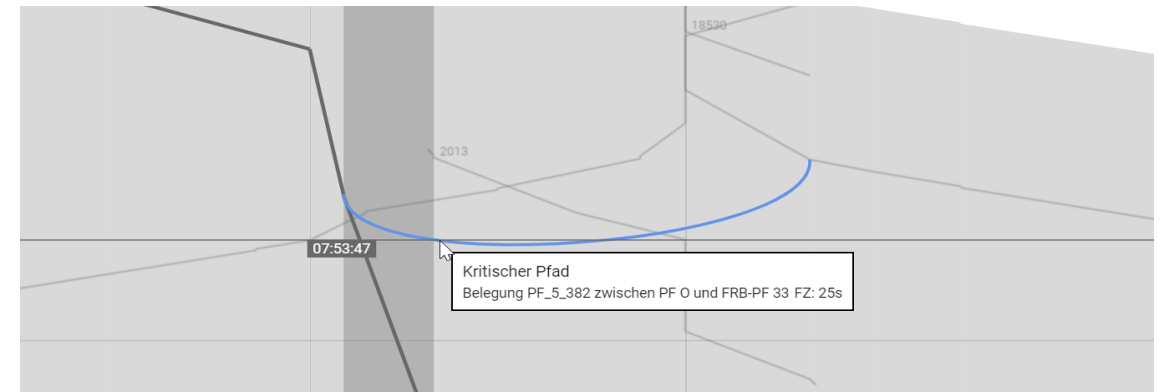


Es gibt **keine Systemunterstützung** bei der Erkennung von **Konflikten**, Abschätzungen von Baustellen und anderen Einflussfaktoren.

NeTS lässt nicht zu, dass alle bekannten Einschränkungen berücksichtigt werden.

Die Prüfung erfolgt **manuell durch den Mitarbeitenden**.

## TMS (Rollout Herbst 2022)



**Systemunterstützte Konflikterkennung** und -lösung. Auswirkungen von Einschränkungen werden aufgezeigt.

Alle **bekanntesten Einschränkungen** sind im Kapazitätsplan **berücksichtigt**.

Kann eine komm. Vorgabe nicht erfüllt werden, wird diese angepasst und die EVUs informiert.

# Unsere Herausforderungen.



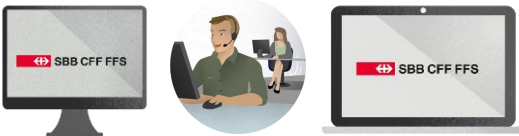
Gesamtsystemkosten der Bahn steigen



rasche Veränderungen der Mobilitätsbedürfnisse im Gütertransport, Pendler- und Freizeitverkehr



Intermodaler Wettbewerb steigt – dank umweltsensitiver Bevölkerung Bahn im Vorteil



**neue Technologien bieten Chancen**



...aber wenn...