

WIRKUNGEN EINER S-BAHN ANGEBOTSERWEITERUNG DURCH DEN EINSATZ GRÖßERER FAHRZEUGE

il INROS LACKNER

Ziele, Grundlagen, Inhalte, Anwendungen

PTV Anwenderseminar 2025
Würzburg, 21.-22.05.2025

Würzburg, 22.05.2025
Volker Stölting, Karsten McFarland, Ermal Sylejmani

DATEN UND FAKTEN

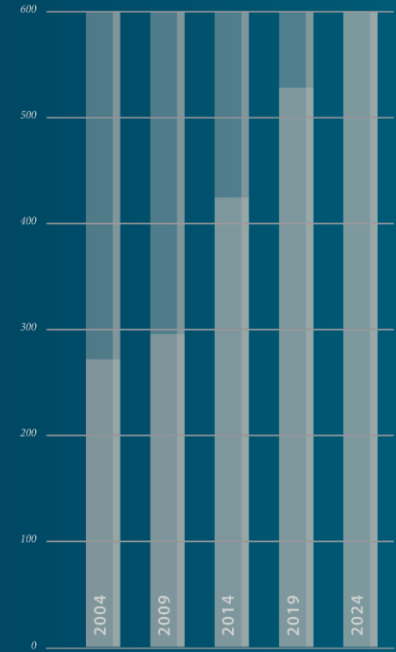


Inros Lackner in Zahlen

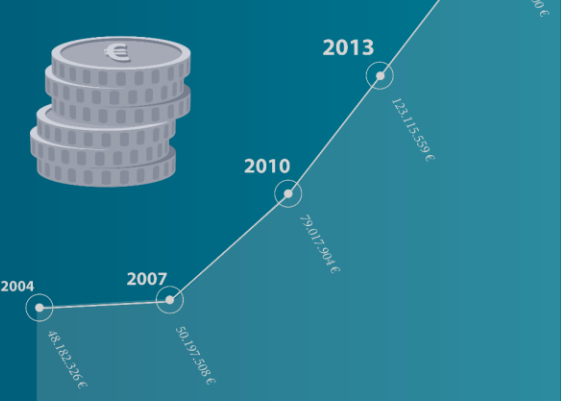
STANDORTE IN DEUTSCHLAND



ZAHL DER BESCHÄFTIGTEN



AUFTRAGSWERT GESAMT



PROJEKTE IN

24

LÄNDERN (2024)



ANZAHL DER PROJEKTE 2004 UND 2024



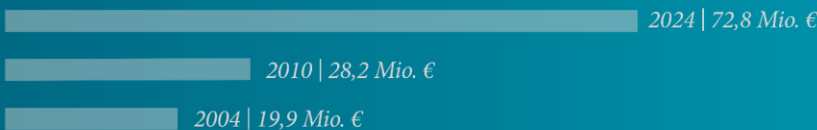
42 %

58 %



39
NATIONALITÄTEN
ARBEITEN IN
UNSEREM
UNTERNEHMEN

UMSATZENTWICKLUNG



ÖPNV ANGEBOTPOTENTIALE -

Kapazitätserweiterungen

Ausgangslage:

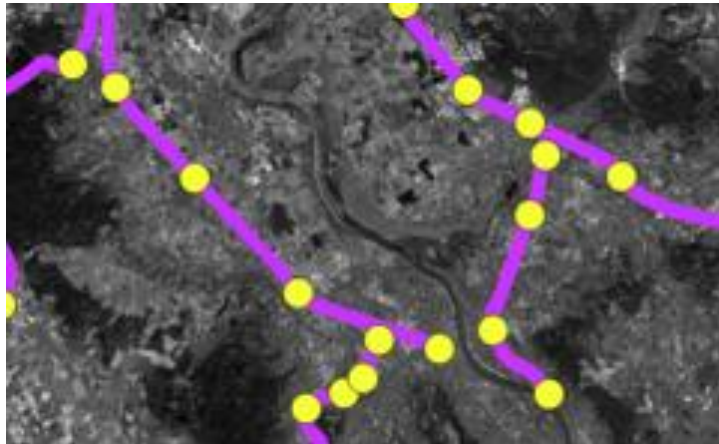
- ▶ Anforderung einer deutlichen Kapazitätserweiterung im S-Bahnbereich,
- ▶ Sehr hohe aktuelle Taktdichte (keine wesentliche weitere Verdichtung möglich)
- ▶ Es bleibt eine Option der Kapazitätserweiterung durch größere Fahrzeuge
- ▶ Im S-Bahn Bereich erfordern längere Züge nicht selten Anpassungen der Bahnhofsinfrastruktur (z.B. längere Bahnsteige, Erweiterung von Zu- und Abgängen der Bahnsteige)

Herausforderung:

- ▶ Wie können Kapazitätserweiterungen sinnvoll modelliert werden?
- ▶ Wie lassen sich Maßnahmen / Szenarien planerisch bewerten und vergleichen?
- ▶ Wie können kapazitive Maßnahmen im standardisierten Verfahren berücksichtigt werden?

ÖPNV ANGEBOTSPOTENTIALE -

Abbildung in PTV Visum



Angebotsnetz

PTV Visum 64 Bit 14.00-05 - Netz: VISUM_Course_03_01_06_01_Timetetable_Editor.ver - [Fahrplan (tabi

Datei Bearbeiten Ansicht Listen Filter Rechnen Grafik Netz Nachfrage Skripte Fenster Hilfe Fa

Fahrplan-Linien

Fahrplan (tabellarisch)

Nr	1	2
Name		
LinName	A	A
RichtungCode	>	>
LinRouteName	Bus A	Bus A
FZProfilName	1	1
BetreiberNr	0	0
TaktfahrtGrpNr	0	0
Anz Fahrplanfahrabschnitte	1	1
VonFZPElemIndex	1	1
NachFZPElemIndex	3	3
Abfahrt	08:00:00	08:10:00
Ankunft	08:03:00	08:13:00
gekoppelt	☐	☐

Fahrplan

Fahrzeugeinheit

Nummer

Code

Name

Basis | Kostensätze

Verkehrssysteme

☒ Triebfahrzeug

Kapazitäten

Gesamtplätze

Sitzplätze

Fahrzeuge

Fahrzeugkombination 1 bearbeiten

Nummer

Code

Name

Basis | Kostensätze

Fahrzeugeinheiten

Verkehrssystem-Schnittmenge	T
1	locomotive
2	wagon

Einfügen Bearbeiten Löschen

Fahrzeugkombinations-Set

Linien



Linienrouten
(räumliche Ausprägung)



Fahrzeitprofile
(zeitliche Ausprägung)



Servicefahrt



Zugbildung

ÖPNV ANGEBOTPOTENTIALE -

Abbildung in PTV Visum – Wirkung von Fahrzeugkapazitäten

ÖV Verkehrsumlegungsverfahren:

- ▶ Standardverfahren berücksichtigen keine Fahrzeugkapazitäten..
- ▶ Auslastungen über 100% sind möglich



ÖV Verkehrsumlegungsverfahren:

- ▶ Kapazitive Restriktionen können ergänzend berücksichtigt werden
- ▶ In Taktfeinen und Fahrplanfeinen Verfahren

ÖPNV KAPAZITIVE UMLEGUNGEN -

PTV Visum – kapazitive Erweiterung des fahrplanfeinen Verfahrens

Harte Kapazitätsschranke

- Wenn die Kapazitätsgrenze eines Fahrzeugs erreicht ist, wird der Zustieg für neue Fahrgäste verhindert.
- Fahrgäste werden auf alternative Verbindungen geroutet.



Quelle: alliance/dpa | Bodo Marks

Weiche Kapazitätsschranke

- Über eine Komfortfunktion und einen Einstiegs-
widerstand wählen Fahrgäste bei zunehmender
Auslastung auf alternative Verbindungen.
- Fahrgäste empfinden es als unangenehm, wenn
stehen müssen (Komfortfunktion).



Quelle: © mzv-tz

22.05.2025

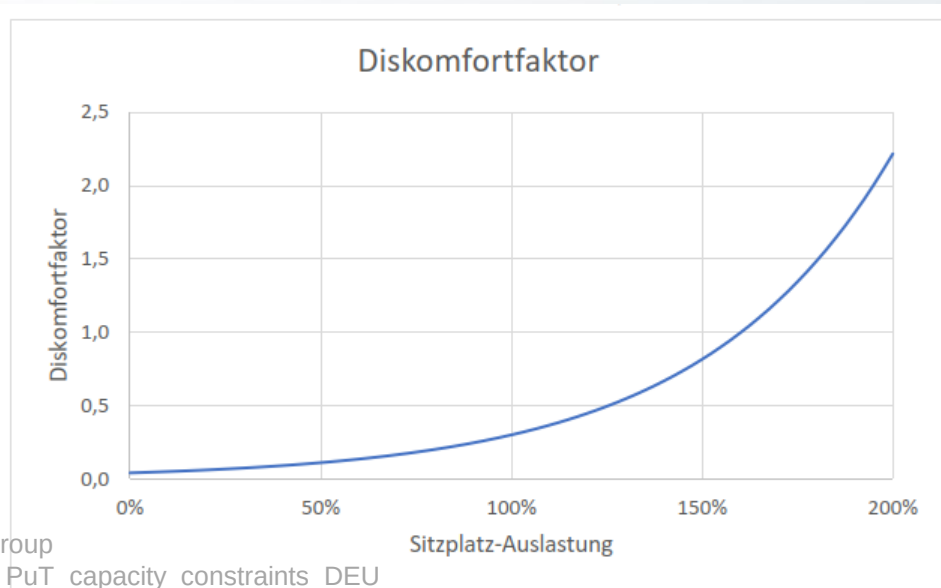
DISKOMFORTFAKTOR

Abbildung in PTV Visum – Weiches Verfahren

Der verringerte Fahrkomfort aufgrund einer hohen Passagierdichte wird als empfundene Reisezeiterhöhung interpretiert. Für einen Teilweg ist diese definiert als Summe aus den Fahrzeiten der benutzten Fahrplanfahrtabschnitte, jeweils multipliziert mit einem Diskomfortfaktor:

Dieser Diskomfortfaktor ist eine Funktion der Sitzplatz-Auslastung:

$Komfortfaktor = 0.3 \cdot e^{2 \cdot Auslastung - 2}$ (e ist die Exponentialfunktion).



Beispiel:

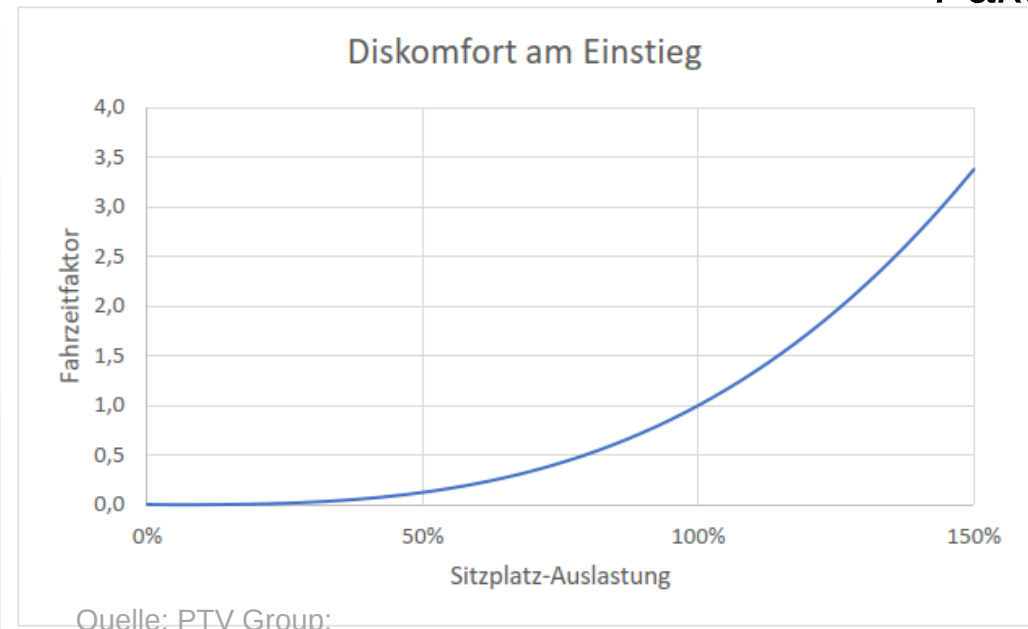
- Bei **100 % Belegung** fühlt sich die Fahrt **30 % „länger“** an.
- Bei **150 % Belegung** (Überfüllung) fühlt sie sich **„viel länger“** an.

EINSTIEGWIDERSTAND -

Weiches Kapazitätsverfahren – Wirkungen des Einstiegsfaktors

Die verringerte Wahrscheinlichkeit, einen Sitzplatz oder überhaupt einen Platz zu erhalten, hängt von der Auslastung am Einstieg ab. Der daraus abgeleitete Faktor für den Widerstand wird durch die folgende Funktion recht gut abgebildet:

$$\text{Faktor} = \text{Auslastung}^3$$



Quelle: PTV Group:
Demand_with_PuT_capacity_constraints_DEU

Die Form ist der Form in der ersten Abbildung sehr ähnlich, allerdings wird ein deutlich höherer Effekt modelliert:

- bei einer 100% Auslastung am Einstieg beträgt die Erhöhung der empfundenen Reisezeit 100%.

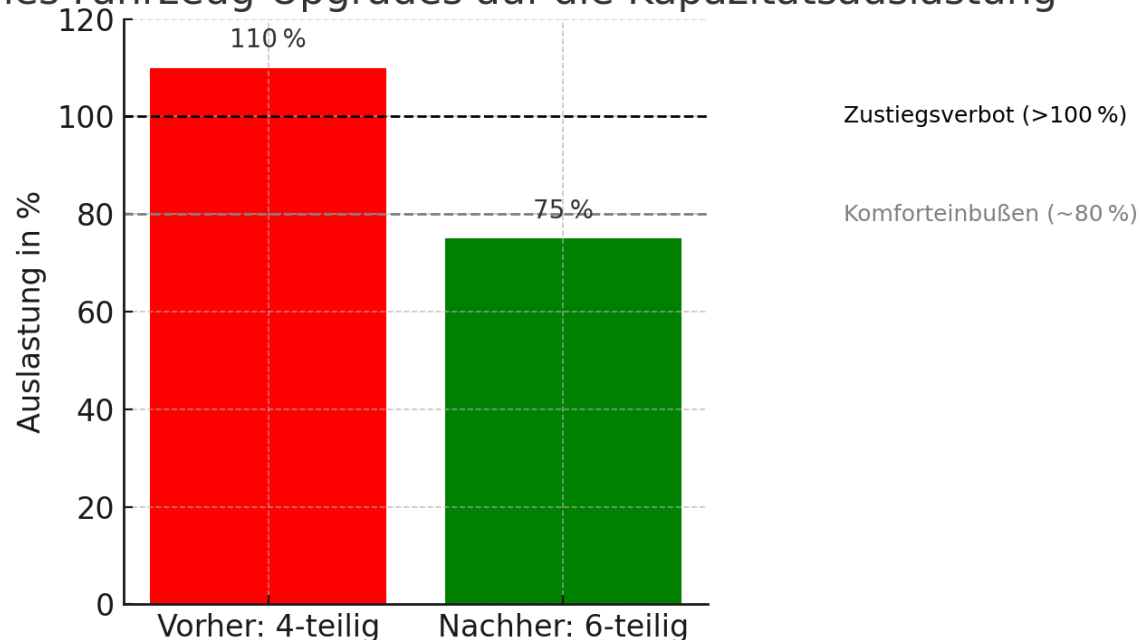
EMPFUNDENE REISEZEIT (ERZ) -

Wirkungen von Kapazitätsänderungen

Nutzergleichgewicht bei Wahlentscheidungen

Empfundene Reisezeit (ERZ)

Wirkung eines Fahrzeug-Upgrades auf die Kapazitätsauslastung



- Attribut: Kapazität (KapGes)
- Kapazitätsauslastung pro Verbindung
- Verhinderte Zustiege bei >100 % Belegung
- Komforteinbußen ab ~80 % Auslastung

Fallbeispiel 1: Überfüllte Linie zur HVZ

- Vorher: 4-teiliger Zug, Auslastung 110 %
 - Nachher: 6-teiliger Zug, Auslastung 75 %
- Wirkung: Kein Zustiegsverbot, besserer Komfort

Kapazitätsabhängiger Widerstand bei Überfüllung

FAHRZEUGEINHEITEN

Von Fahrzeugen zur Zugbildung (Fahrzugkombination)

Eine weitere Aufgabe der strategischen Planung ist die Planung des Fahrzeugeinsatzes abhängig von der Kapazität der einzelnen Fahrzeugkombinationen und von der Nachfrage auf Fahrtebene. Hierfür kann das Verfahren Umlaufbildung mit Fahrzeug austausch verwendet werden.

OV-Fahrzeuge und OV-Fahrzeugkombinationen

Anzahl	6	Nummer	Code	Name
1	1	SBus	StandardBus	
2	2	MBus	MiniBus	
3	3	Tram	Tram	
4	4	Train	Train	
5	5	IC	IC	
6	6	RR	RR	

Fahrzeugeinheit 3 bearbeiten

Nummer: 3
Code: Tram
Name: Tram

Basis | Kostensätze

Verkehrssysteme: TRAM

☒ Triebfahrzeug

Kapazitäten
Gesamtplätze: 200
Sitzplätze: 10

OK Abbrechen

Strategische
Planung

Nachfrageanalyse



Umlaufbildung

Fahrzeugeinsatz

KONZEPT DER FAHRZEUGKOMBINATION



Vom Fahrzeug über Zugbildung zur Servicefahrt

Verkehrssystem- / Servicefahrtzuordnung

Fahrzeugeinheiten nur für kompatible Systeme

Kapazitätsplanung

Sitzplätze und Gesamtplätze pro Fahrzeug

Kostenmodellierung

Separate Sätze für Fahrplan- und Leerfahrten

Konfigurationsflexibilität

Bedarfsgerechte Anpassungsfähigkeit

EINSATZ VON FAHRZEUGEN

Abbildung in PTV Visum mit Fahrzeugkombinationen

Eine weitere Aufgabe der strategischen Planung ist die Planung des Fahrzeugeinsatzes abhängig von der Kapazität der einzelnen Fahrzeugkombinationen und von der Nachfrage auf Fahrtebene. Jede Fahrzeugeinheit ist einem oder mehreren Verkehrssystemen zugeordnet. **Es kann nur für Fahrten, Linien oder Systemrouten verwendet werden, die zu einem dieser Verkehrssysteme gehören.** Neben den Sitzplätzen und der Gesamtzahl der Plätze können Kostensätze pro Entfernung- und Zeiteinheit jeweils für Fahrplanfahrten und Leerfahrten getrennt eingegeben werden.

ÖV-Fahrzeuge und ÖV-Fahrzeugkombinationen

Fahrzeugeinheiten	Fahrzeugkombinationen		
Anzahl: 6	Nummer	Code	Name
1	1	SBus	StandardBus
2	2	MBus	MiniBus
3	3	Tram	Tram
4	4	Train	Train
5	5	IC	IC
6	6	RR	RR

Fahrzeugkombination 3 bearbeiten

Nummer: Code: Name:

Basis | Kostensätze

Fahrzeugeinheiten

Nummer	Code	Name	Anzahl Fahrzeuge	Verkehrssysteme	Sitzplätze	Gesamtplätze
1	3	Tram	Tram	1	TRAM	10 / 200

Verkehrssystem-Schnittmenge: TRAM
Sitzplätze / Gesamtplätze: 10 / 200

Ersetzende Fahrzeugkombinationen bei Fahrzeugtausch:
Fahrzeugkombinations-Set: <leer>

Fahrzeugkombinations-Set ändern

Benutzerdefiniertes Attribut (Fahrzeugkombinationen) bearbeiten

Attribut-ID:

Code:

Name:

Kommentar:

Gruppe:

Datentyp: Subattributtyp:

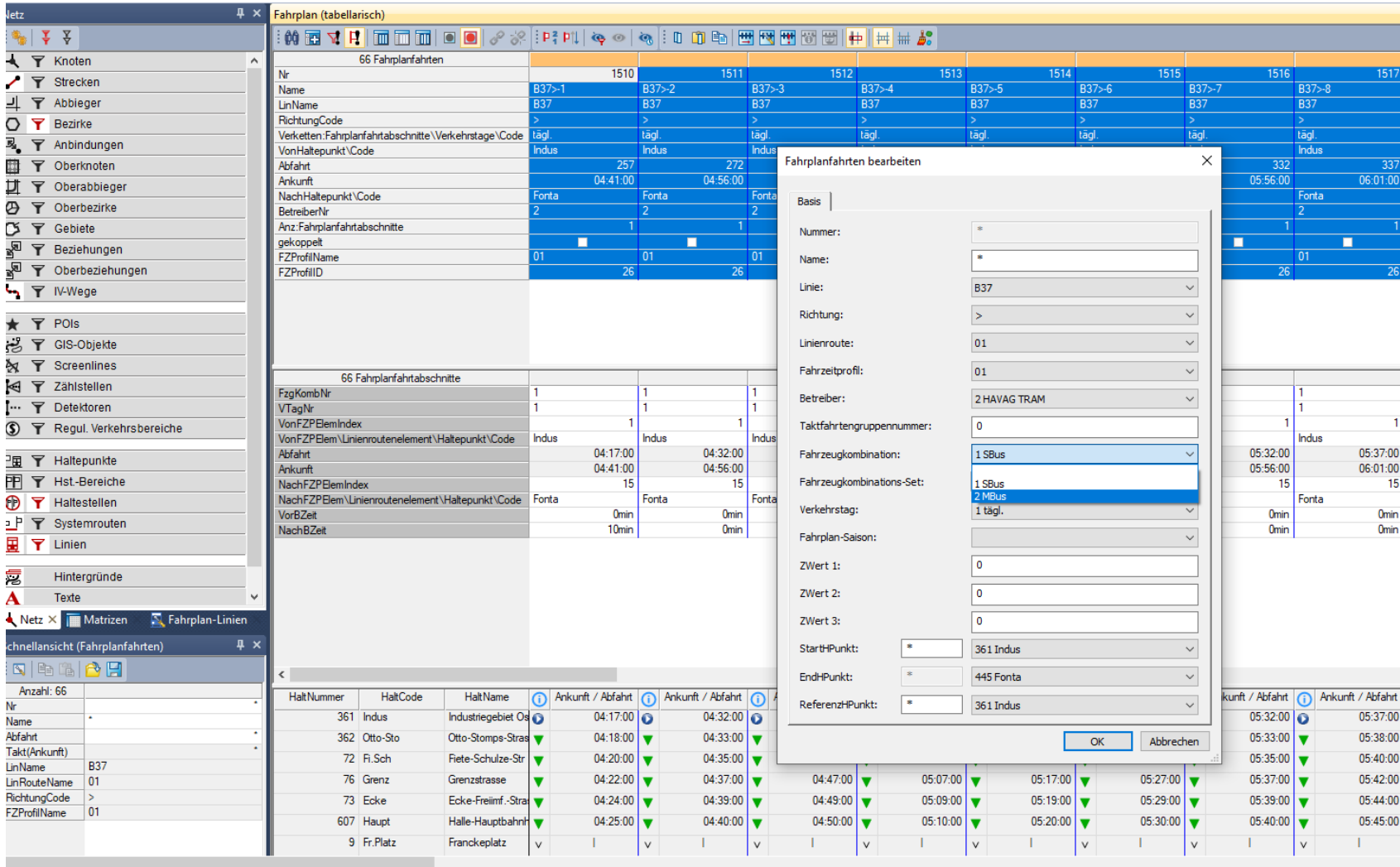
Attributtyp: ☐ Datenattribut ☒ Formelattribut

Dezimalstellen:

Das Ergebnisattribut wird durch den nachfolgenden Ausdruck festgelegt.

ZUORDNUNG - FAHRZEUGKOMBINATIONEN

Zentrale Rolle des Fahrplanneditor bei der Zuordnung von Fahrzeugkombinationen



The screenshot displays the INROS LACKNER Fahrplanneditor software interface. The main window shows a timetable editor with a table of 66 Fahrplanfahrten (timetable runs) and 66 Fahrplanfahrabschnitte (timetable run segments). A dialog box titled "Fahrplanfahrten bearbeiten" (Edit timetable runs) is open, showing the configuration for a specific run. The dialog includes fields for Basis, Nummer, Name, Linie, Richtung, Linienroute, Fahrzeitprofil, Betreiber, Taktfahrgruppennummer, Fahrzeugkombination, Fahrzeugkombinations-Set, Verkehrstag, Fahrplan-Saison, ZWert 1, ZWert 2, ZWert 3, StartHPoint, EndHPoint, and ReferenzHPoint. The Fahrzeugkombination field is set to "1 SBus" and the Fahrzeugkombinations-Set is set to "1 SBus, 2 MBus, 1 tagl.". The StartHPoint is set to "361 Indus" and the EndHPoint is set to "445 Fonta".

Fahrplan (tabellarisch)

Nr	1510	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517
Name	B37>-1	B37>-2	B37>-3	B37>-4	B37>-5	B37>-6	B37>-7	B37>-8
LinName	B37	B37	B37	B37	B37	B37	B37	B37
RichtungCode	>	>	>	>	>	>	>	>
Verketten: Fahrplanfahrabschnitte\Verkehrstage\Code	tägl.	tägl.	tägl.	tägl.	tägl.	tägl.	tägl.	tägl.
VonHaltepunkt\Code	Indus	Indus	Indus	Indus	Indus	Indus	Indus	Indus
Abfahrt	257	272						
Ankunft	04:41:00	04:56:00						
NachHaltepunkt\Code	Fonta	Fonta	Fonta	Fonta	Fonta	Fonta	Fonta	Fonta
BetreiberNr	2	2	2					
Anz. Fahrplanfahrabschnitte	1	1						
gekoppelt								
FZProfilName	01	01	01					
FZProfilID	26	26						

66 Fahrplanfahrabschnitte

FzgKombNr	1	1	1
VTagNr	1	1	1
VonFZPElemIndex	1	1	1
VonFZPElem\Linienrounelement\Haltepunkt\Code	Indus	Indus	Indus
Abfahrt	04:17:00	04:32:00	
Ankunft	04:41:00	04:56:00	
NachFZPElemIndex	15	15	
NachFZPElem\Linienrounelement\Haltepunkt\Code	Fonta	Fonta	Fonta
VorBZeit	0min	0min	
NachBZeit	10min	0min	

Fahrplanfahrten bearbeiten

Basis: =

Nummer: =

Name: *

Linie: B37

Richtung: >

Linienroute: 01

Fahrzeitprofil: 01

Betreiber: 2 HAVAG TRAM

Taktfahrgruppennummer: 0

Fahrzeugkombination: 1 SBus

Fahrzeugkombinations-Set: 1 SBus, 2 MBus, 1 tagl.

Verkehrstag: =

Fahrplan-Saison: =

ZWert 1: 0

ZWert 2: 0

ZWert 3: 0

StartHPoint: 361 Indus

EndHPoint: 445 Fonta

ReferenzHPoint: 361 Indus

OK Abbrechen

WEICHE KAPAZITÄTSBESCHRÄNKUNG -

Parametrisierung

Verfahrensablauf							
		Aktiv	Verfahren	Bezugsobjekt(e)	Variante/Datei	Kommentar	
5		☒	Umlegungsergebnisse löschen		Alle		
1	▶	☒	ÖV-Umlegung	PT PT Trips	Fahrplanfein		22.11.201 0min
2		☒	ÖV-betriebliche Kennzahlen zurücksetzen		...		
3		☒	ÖV-betriebliche Kennzahlen		...		
4		☒	ÖV-Kenngrößenmatrix berechnen	PT PT Trips	Fahrplanfein		
5		☒					

Parameter für ÖV-betriebliche Kennzahlen

Allgemein | Betriebsleistung | **Verkehrsleistung** | Erlöse | Infrastrukturkosten | Benutzerdefinierte Attr.

Berechne Kennzahlen für: Gebiet und Gebiet x Fahrplanfahrt x Fahrzeugkombination

☒ Kennzahlen auch für Fahrplanfahrtelemente speichern

☐ Nur aktive Fahrplanfahrabschnitte berücksichtigen

☒ Nur aktive Gebiete berücksichtigen

☐ ÖV-Detail für Fahrplanfahrtelemente berechnen

☐ Gebiet x Fahrplanfahrtelement

☐ Gebiet x Fahrplanfahrtelement x Fahrzeugkombination

☐ Haltanalyse berechnen

Berechne Kennzahlen für: Haltepunkt x VSys

Taktbasierte Fahrzeitprofile

Fahrzeitprofil ist taktbasiert:

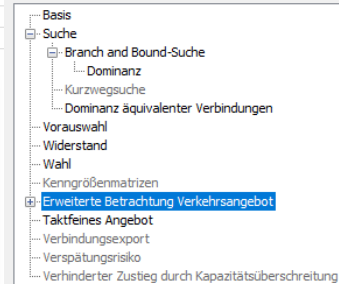
☐ nur aktive Fahrzeitprofile berücksichtigen

Takt

Anzahl: 1	Start-Zeitpunkt des Zeitintervalls	Attribut
1	00:00:00	...

Informationen über taktbasierte Fahrzeitprofile aus anderem Verfahrensschritt kopieren

Parameter Umlegungsverfahren: Fahrplanfein



Erweiterte Betrachtung Verkehrsangebot

Das Verfahren wird iterativ ausgeführt, wenn Sie eine der folgenden Komponenten verwenden:

- Kapazitätsbeschränkung mit weicher Schranke
- Sharing-Verkehrssysteme
- DRT (Demand Responsive Transport)

☒ Kapazitätsbeschränkung für Fahrplanfahrten verwenden

☒ Weiche Kapazitätsschranke

☐ Verhinderter Zustieg durch Kapazitätsüberschreitung

☐ DRT (Demand Responsive Transport) verwenden

Konvergenzprotokoll

☐ Konvergenz protokollieren

Protokolldatei:

KAPAZITÄT - WIDERSTANDSMODELLE

Verfügbare Widerstandsmodell

Berechnung der Kapazitätsbeschränkung

- Die Berechnung erfolgt durch **auslastungsabhängige Widerstände**.
- Die **Belastung eines Fahrplans** ergibt sich aus der Summe aller Verbindungen, die ein Fahrplanfahrtelement nutzen.
- Vier Modelle für die Widerstands Berechnung:
 - **Deutsche Bahn (DB)**: Berücksichtigung der erwarteten Stehzeiten.
 - **Schweizer Bundesbahnen (SBB)**: Zunehmende Widerstände bei zunehmend überlasteten Fahrplanfahrtelementen.
 - **DGIPM-CGSP (SNCF)**
 - **Linear**

Parameter Umlegungsverfahren: Fahrplanfein

Basis

Suche

- Branch and Bound-Suche
 - Dominanz
 - Kurzwegsuche
 - Dominanz äquivalenter Verbindungen
- Vorauswahl
- Widerstand
- Wahl
- Kenngroßenmatrizen
- Erweiterte Betrachtung Verkehrsangebot
 - Iterationen
 - Auslastungsabhängiger Widerstand Fahrplanfahrten**
 - Sharing allgemein
 - Auslastungsabhängiger Widerstand Sharing
 - DRT allgemein
 - DRT Startwerte
 - DRT Ausgabe
 - DRT Touren
 - DRT Tourenplanung
 - DRT Standorte
 - Widerstand DRT-Angebotsvariabilität
- Taktfeines Angebot
- Verbindungsexport
- Verspätungsrisiko
- Verhinderter Zustieg durch Kapazitätsüberschreitung

Auslastungsabhängiger Widerstand Fahrplanfahrten

Gesamtkapazität je Fahrplanfahrtelement:

Sitzplatzkapazität je Fahrplanfahrtelement:

Genutzte Widerstandsfunktion: DB

Parameter Widerstandsfunktion DB

Die erwarteten Steherminuten einer Verbindung V sind der Mittelwert der Minuten, in der ein Kunde im Verlauf einer Reise keinen Sitzplatz hat, wenn jedem Fahrplanfahrtelement die Sitzplätze zufällig unter den Reisenden vergeben werden.

Die Steherwahrscheinlichkeit S auf einem Fahrplanfahrtelement v ergibt sich dabei durch die Auslastung A auf v:

$$S_v = \frac{1}{1 + b \cdot A_v^a}$$

a =

b =

Die erwarteten Steherminuten W einer Verbindung V werden aus der Steherwahrscheinlichkeit S und Fahrzeit F der einzelnen Fahrplanfahrtelemente berechnet durch:

$$W_V = \sum_{v \in V} S_v \cdot F_v$$

ERWARTETE WARTEZEITEN (DB)

Vorteile:

Abbildung von Kapazitäten ohne Zustiegsverweigerung

- Fahrgäste müssen nicht sofort eine Alternative suchen, sondern können die Verbindung weiter nutzen – allerdings mit höheren „Kosten“ (Diskomfort).
- Dies ermöglicht eine weichere Steuerung der Nachfrageverlagerung im Verkehrsnetz.

Berücksichtigung von Alternativrouten über mehrere Iterationen

- Durch die iterative Berechnung werden nachträglich auch Routen berücksichtigt, die in einer früheren Iteration als „ungeeignet“ verworfen wurden.

Flexibilität durch verschiedene Berechnungsmethoden

- Der Verbindungswiderstand kann dynamisch aktualisiert werden, je nach gewähltem Modell für auslastungsabhängige Widerstände.
- Dies ermöglicht eine feinere Steuerung der Nachfrageverlagerung.

Nachteile:

Kein vollständiges „Verhindern“ von Überlastung

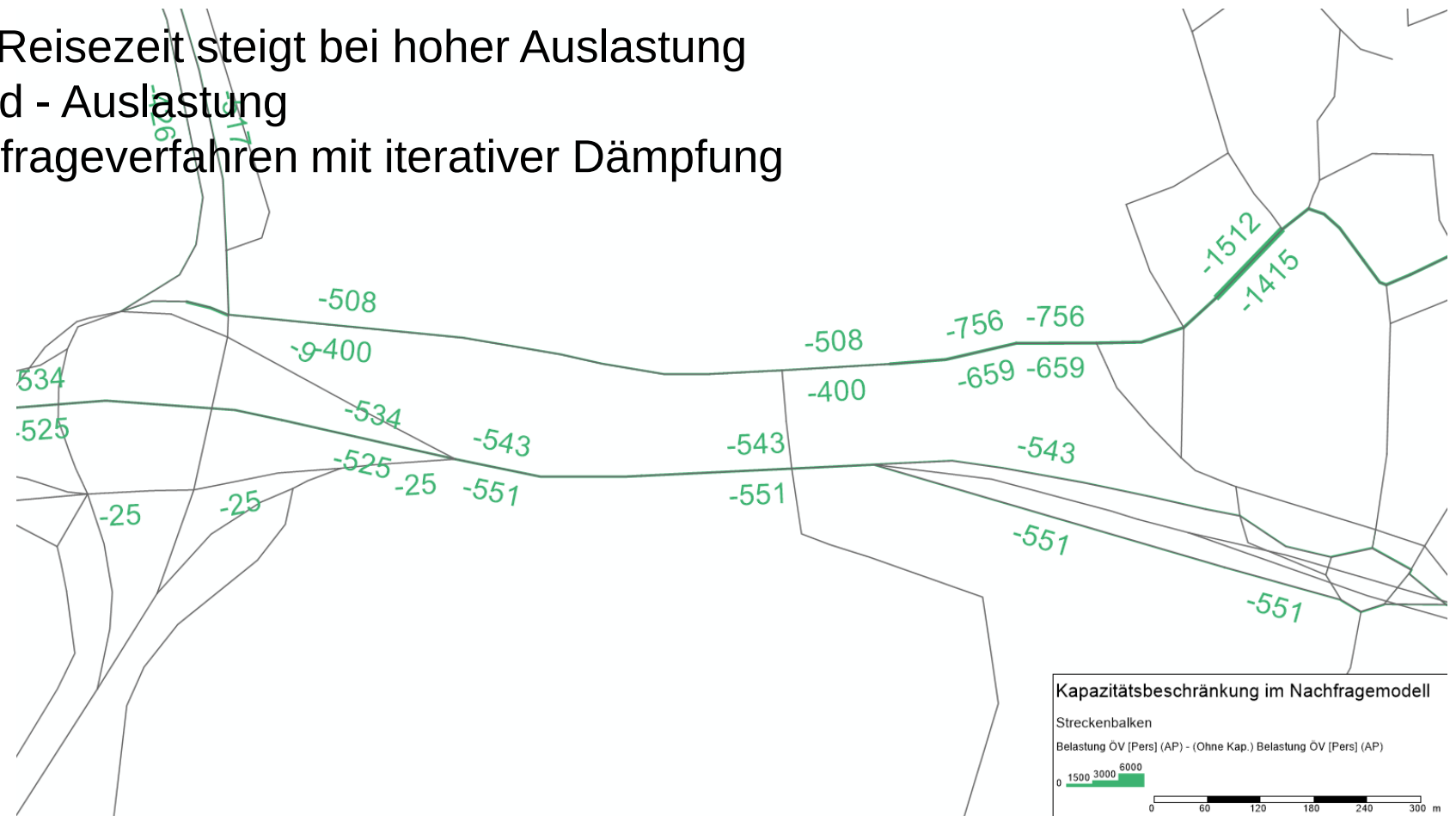
- Fahrzeuge können trotz Überlastung weiter genutzt werden, was in der Realität nicht immer praktikabel ist (z. B. Sicherheit, Komfort).
- Dies könnte dazu führen, dass eine Überlastung zu lange toleriert wird, bevor sich die Fahrgastströme tatsächlich anpassen.

Modellierungsfehler durch ungenaue Kalenderdaten

- Da jedes Fahrplanfahrtelement nur eine durchschnittliche Auslastung hat, können Schwankungen innerhalb einzelner Verkehrstage nicht exakt abgebildet werden.
- In der Realität gibt es Stoßzeiten, die zu unterschiedlichen Auslastungen an verschiedenen Tagen führen können – diese Information geht verloren.

NACHFRAGEWIRKUNGEN DURCH KAPAZITÄTSBESCHRÄNKUNG

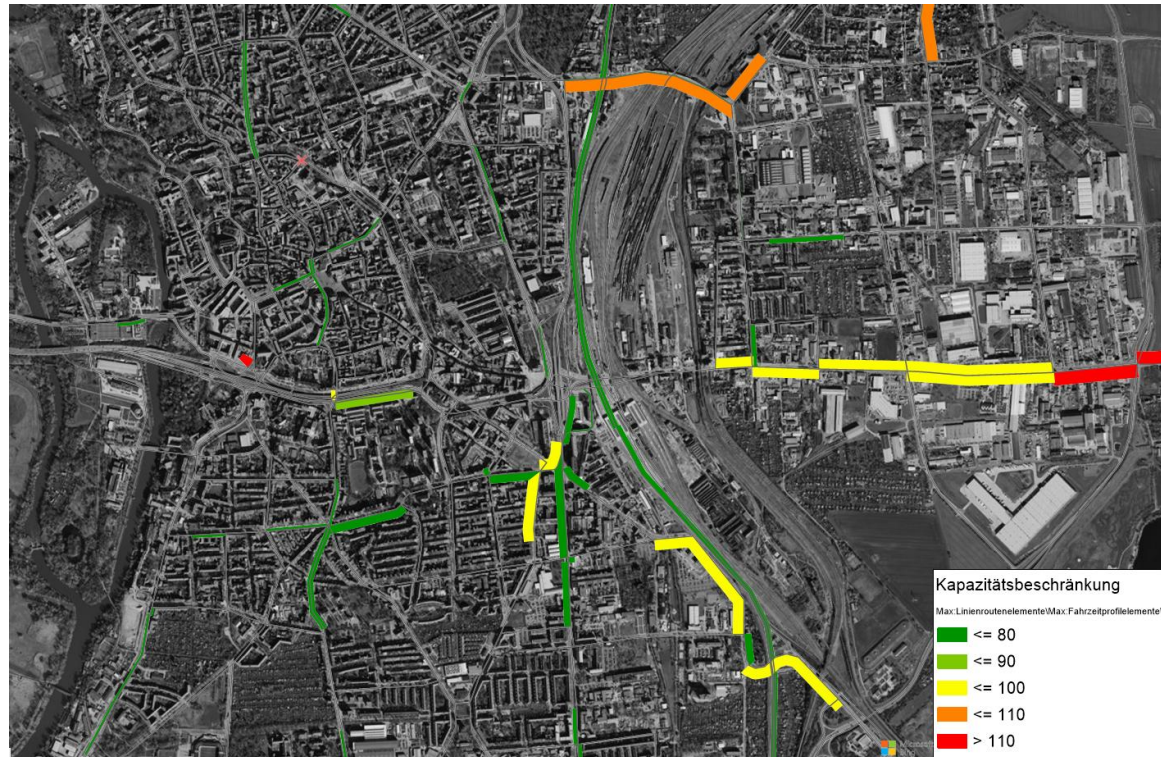
Diskomfortmodell: Reisezeit steigt bei hoher Auslastung
Zustieg: Widerstand - Auslastung
Integration in Nachfrageverfahren mit iterativer Dämpfung



KAPAZITÄTSWIRKUNGEN - TAKTFEIN

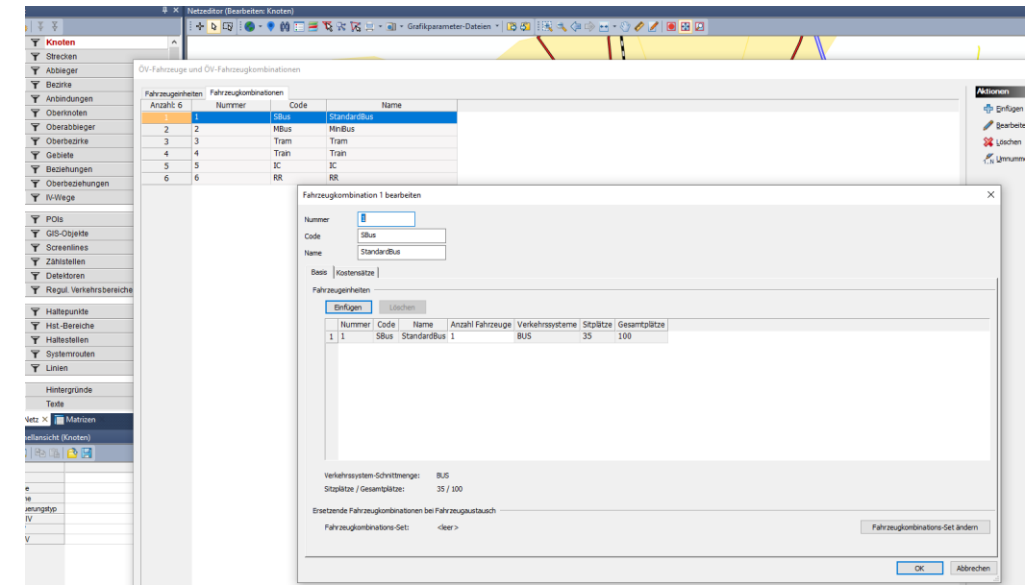
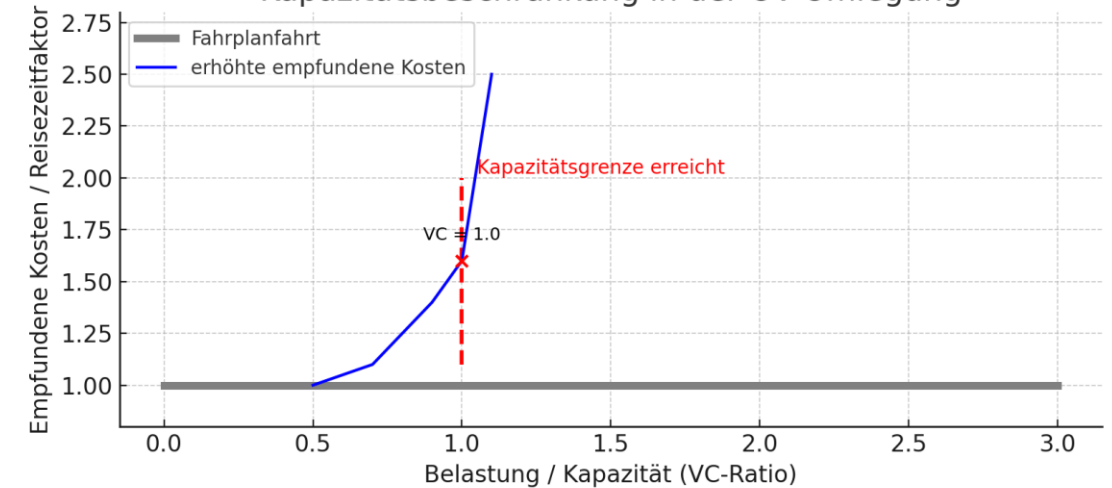
Anwendung von Kapazitätsbeschränkungen im Taktfeinen Verfahren

- Zuschläge auf Fahrzeit bei hoher Auslastung (VD-Funktion)
- Anwendung auf Fahrzeitprofile,
- Skriptlösung berücksichtigt Belastung in Widerstandsfunktion



Quelle: PTV Group
PuT_Cap-Restr_Headway

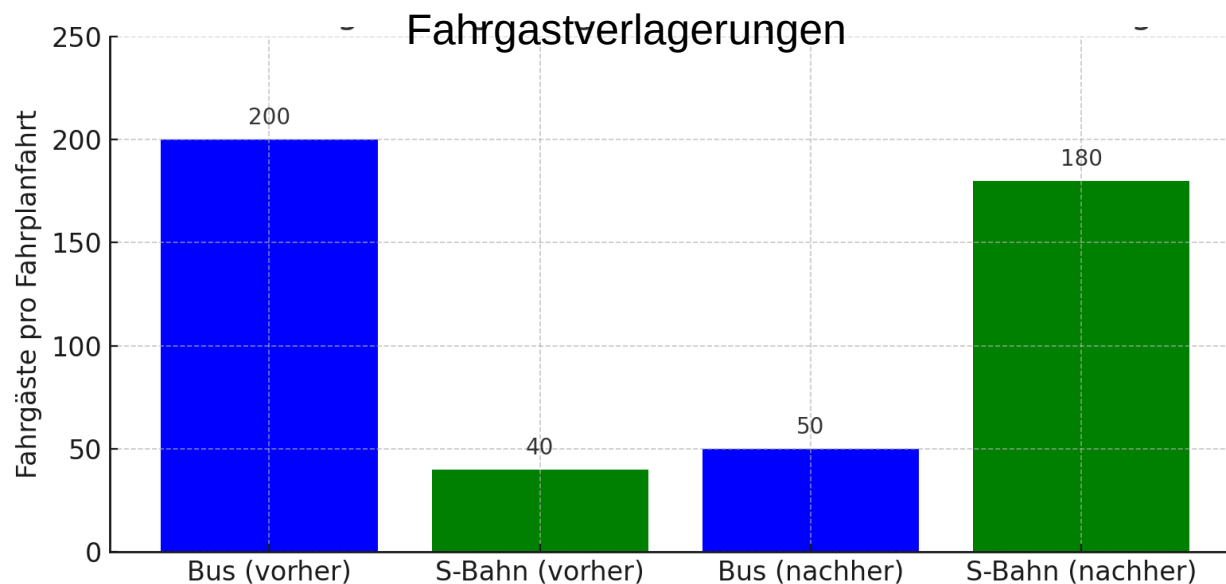
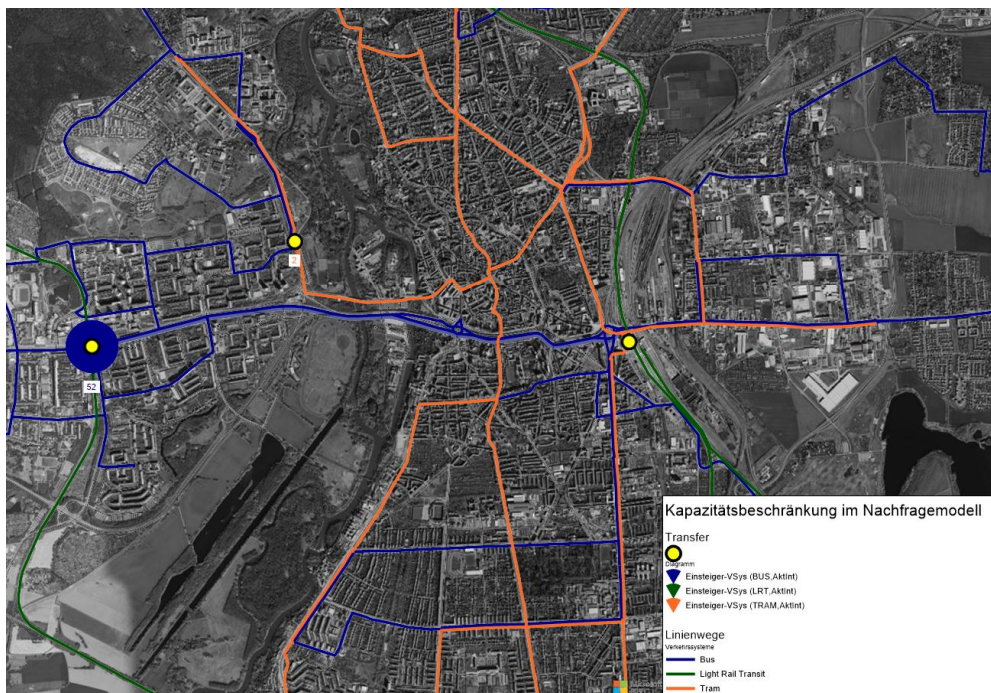
Kapazitätsbeschränkung in der ÖV-Umlegung



KAPAZITÄTSWIRKUNGEN - FAHRPLANFEIN



Anwendung von Kapazitätsbeschränkungen im Fahrplanfeinen Verfahren



- Belastung pro Fahrplanfahrt direkt berücksichtigt
- Auslastungsabhängiger Widerstand je Verbindung
- Führt zu Nachfrageverlagerung auf weniger ausgelastete Fahrten
- Kapazitätsberücksichtigung aller Verkehrssysteme zur Vermeidung von Verlagerungseffekten

STANDORT

Hannover



Theaterstraße 15
30159 Hannover
Telefon: 0511 3 67 00 0
Telefax: 0511 3 67 00 149
E-Mail: hannover@inros-lackner.de

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

il INROS LACKNER

INROS-LACKNER.DE

kurunu in x



Prof. Dr.-Ing. Volker Stölting
Niederlassungsleiter Hannover
Volker.Stoelting@inros-lackner.de
+49 511 36700 342

Dipl.-Geogr. Karsten McFarland
Senior Consultant
Karsten.McFarland@inros-lackner.de
+49 511 36700 203

Ermal Sylejmani, MSc.
Projektleiter
Ermal.Sylejmani@inros-lackner.de
+49 511 36700 217