

# **MODELLIERUNG INTER-MODALER WEGE IN MULTI-MODALE VERKEHRSNETZE**

**Piet H.L. Bovy**

**Technische Universitat Delft, Niederlande**

# Wege zum Flughafen (Kloten)

Kloten



Bhf. Oerlikon



Wohnung



ETH Z.



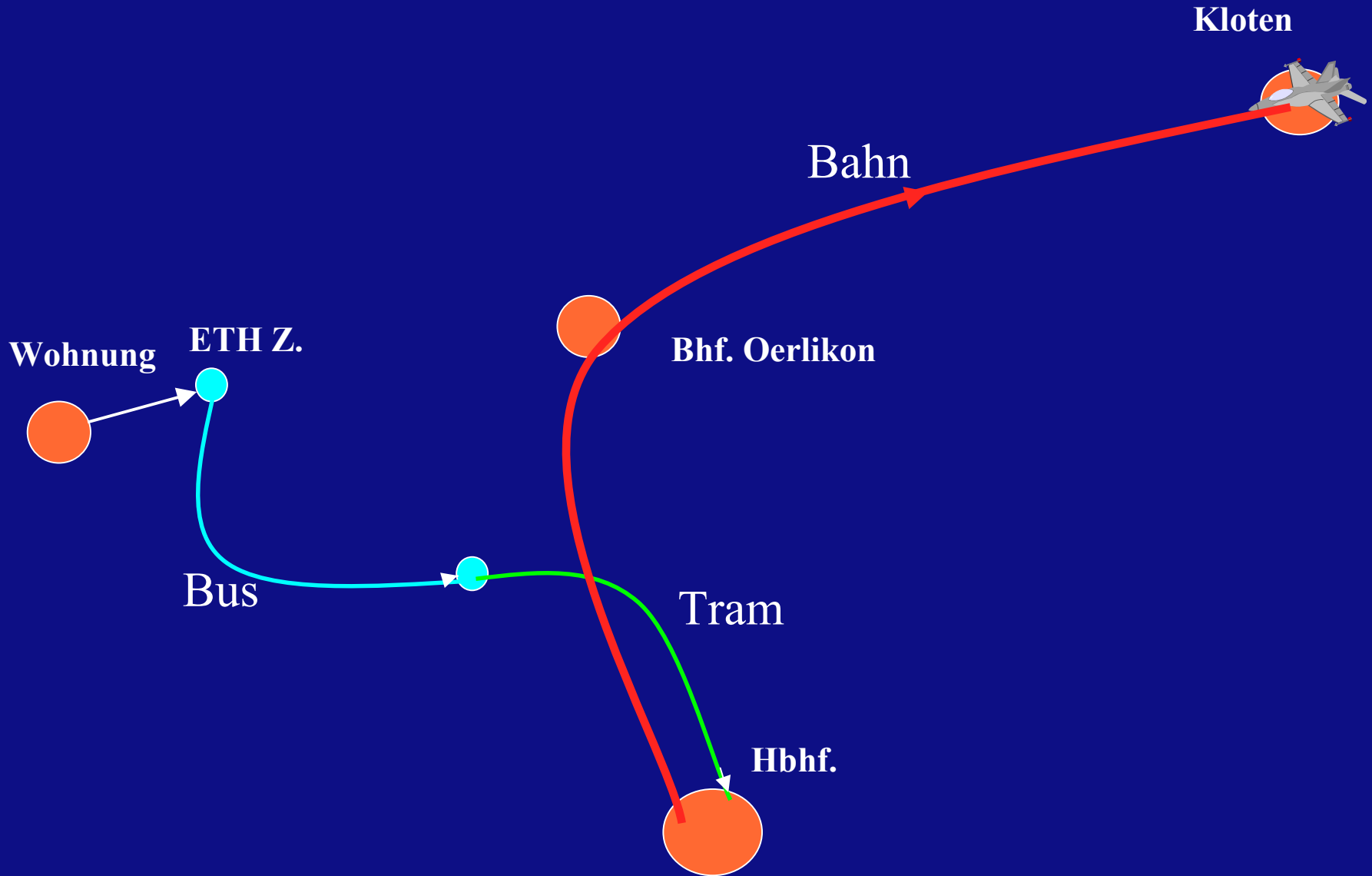
Busplatz



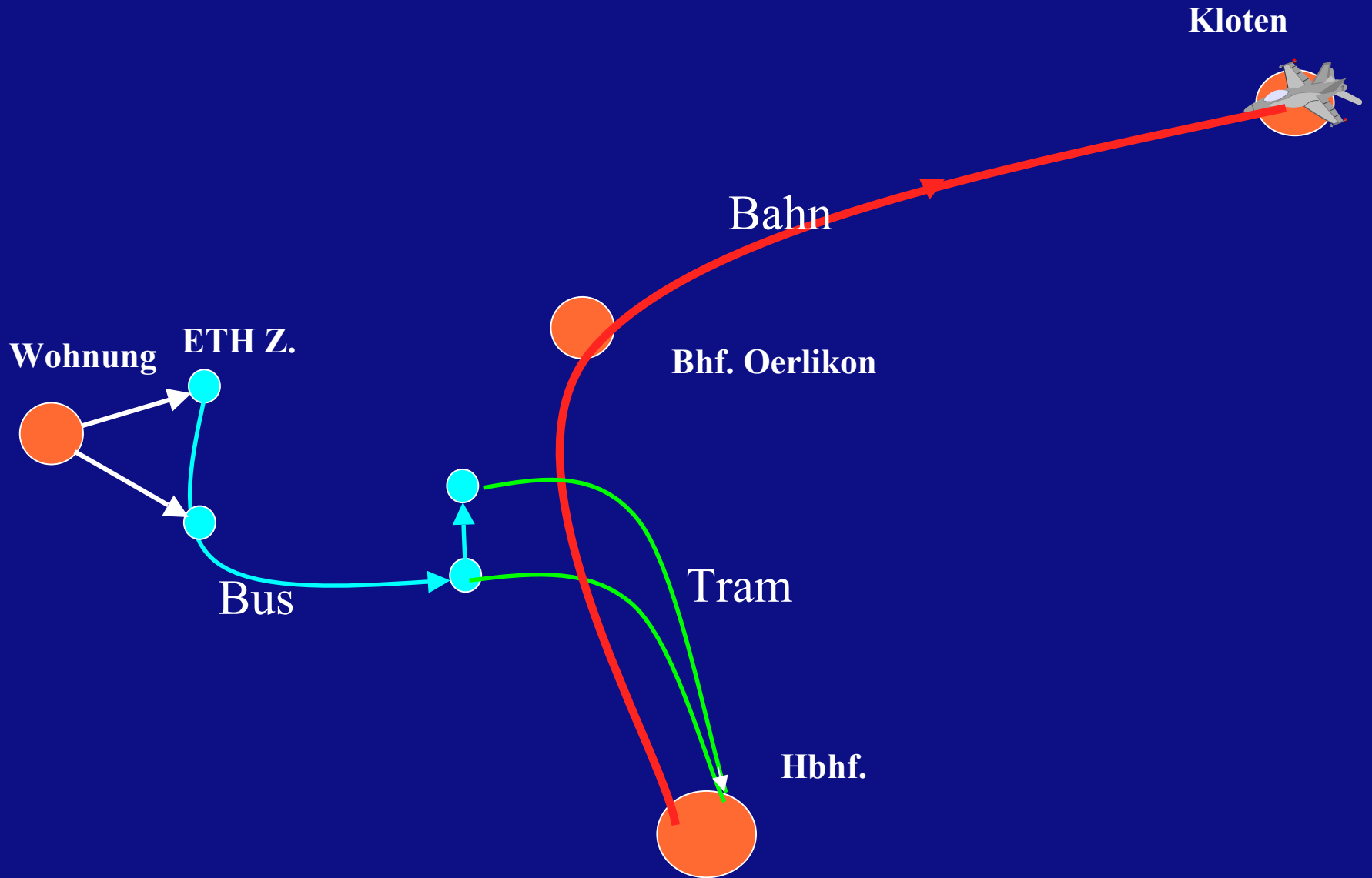
Hbf.



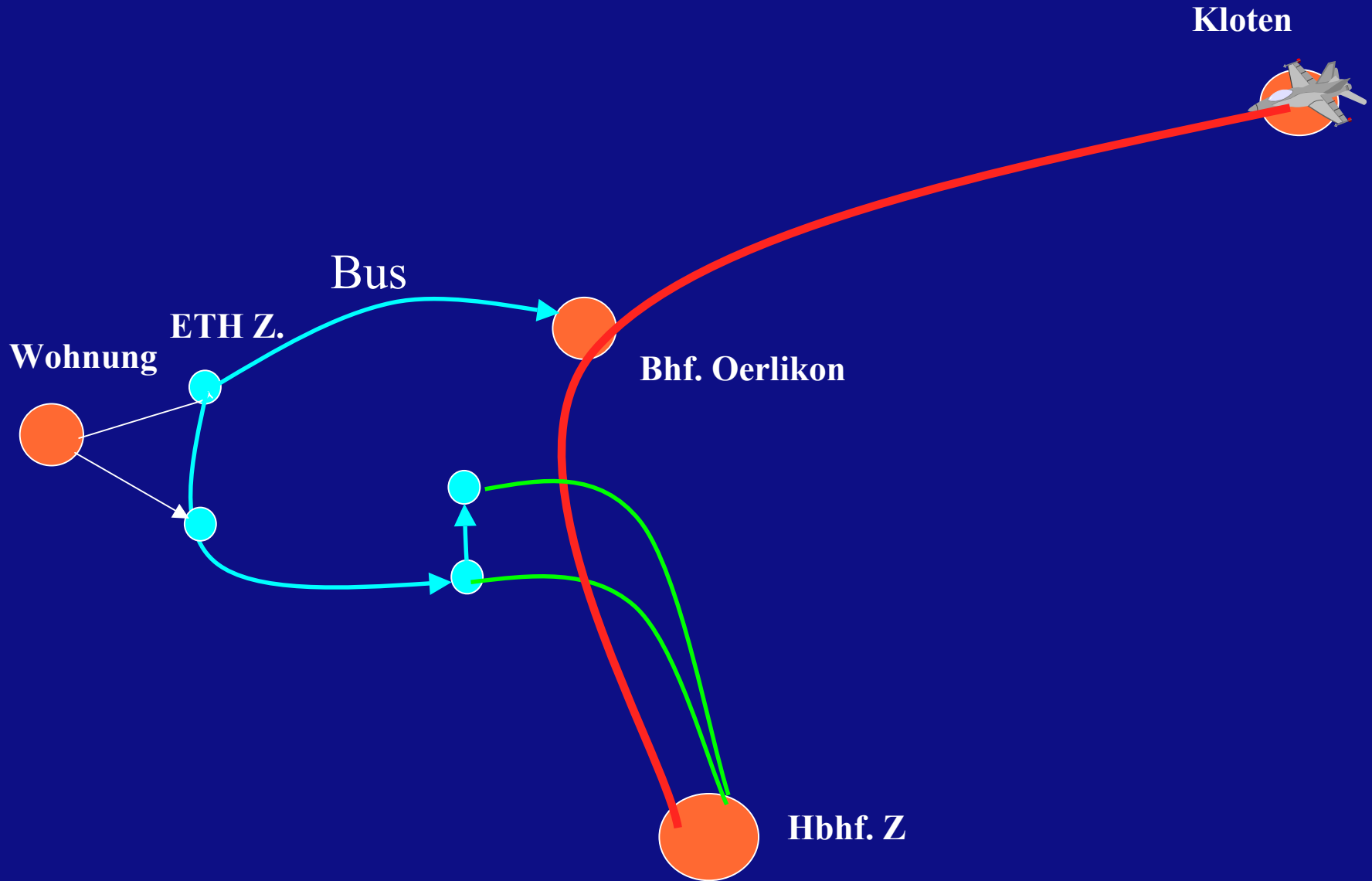
# Route Nr. 1: Bus, Tram, Bahn



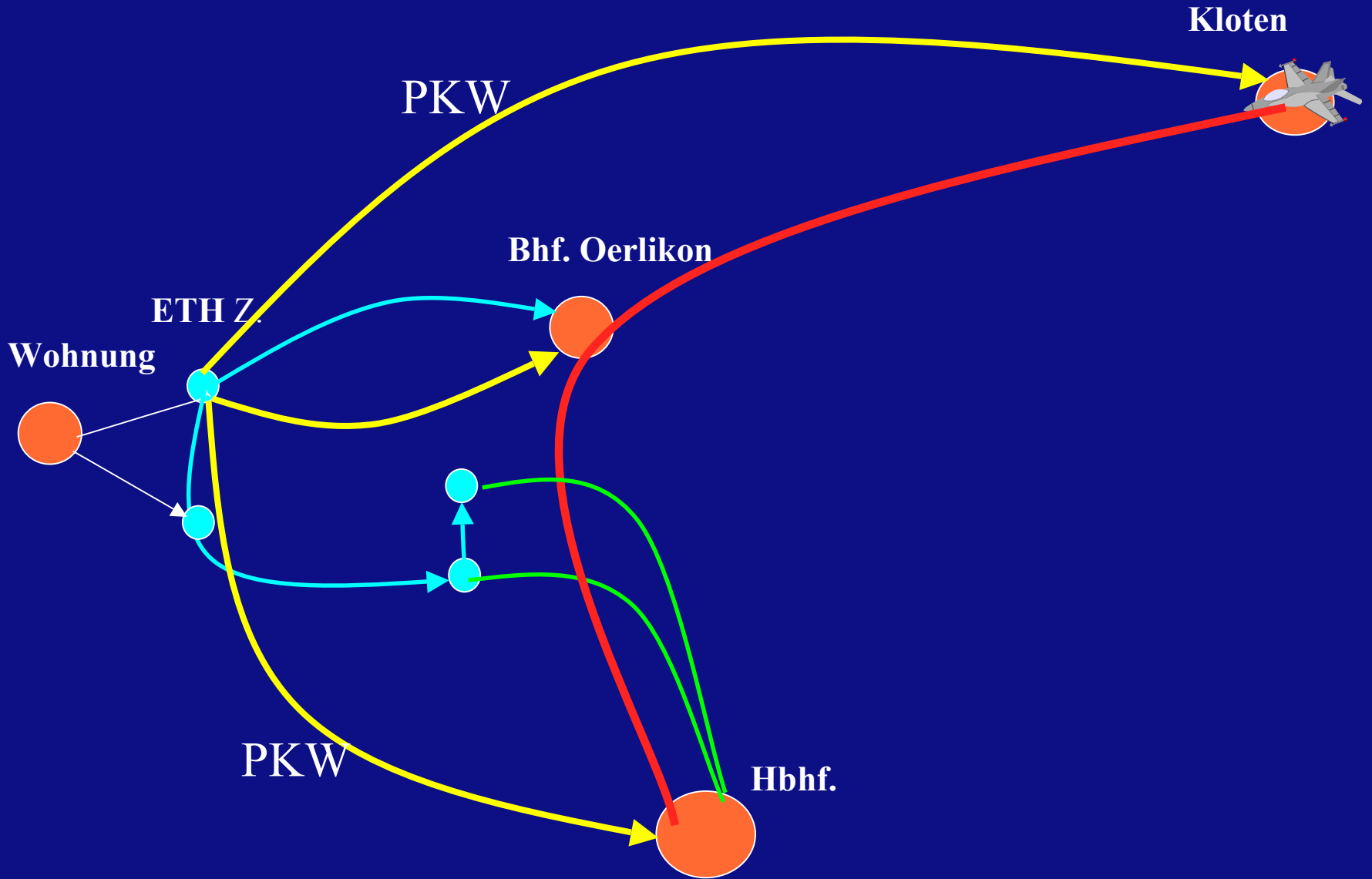
# Route Nr. 2, 3 : Bus, Tram, Bahn



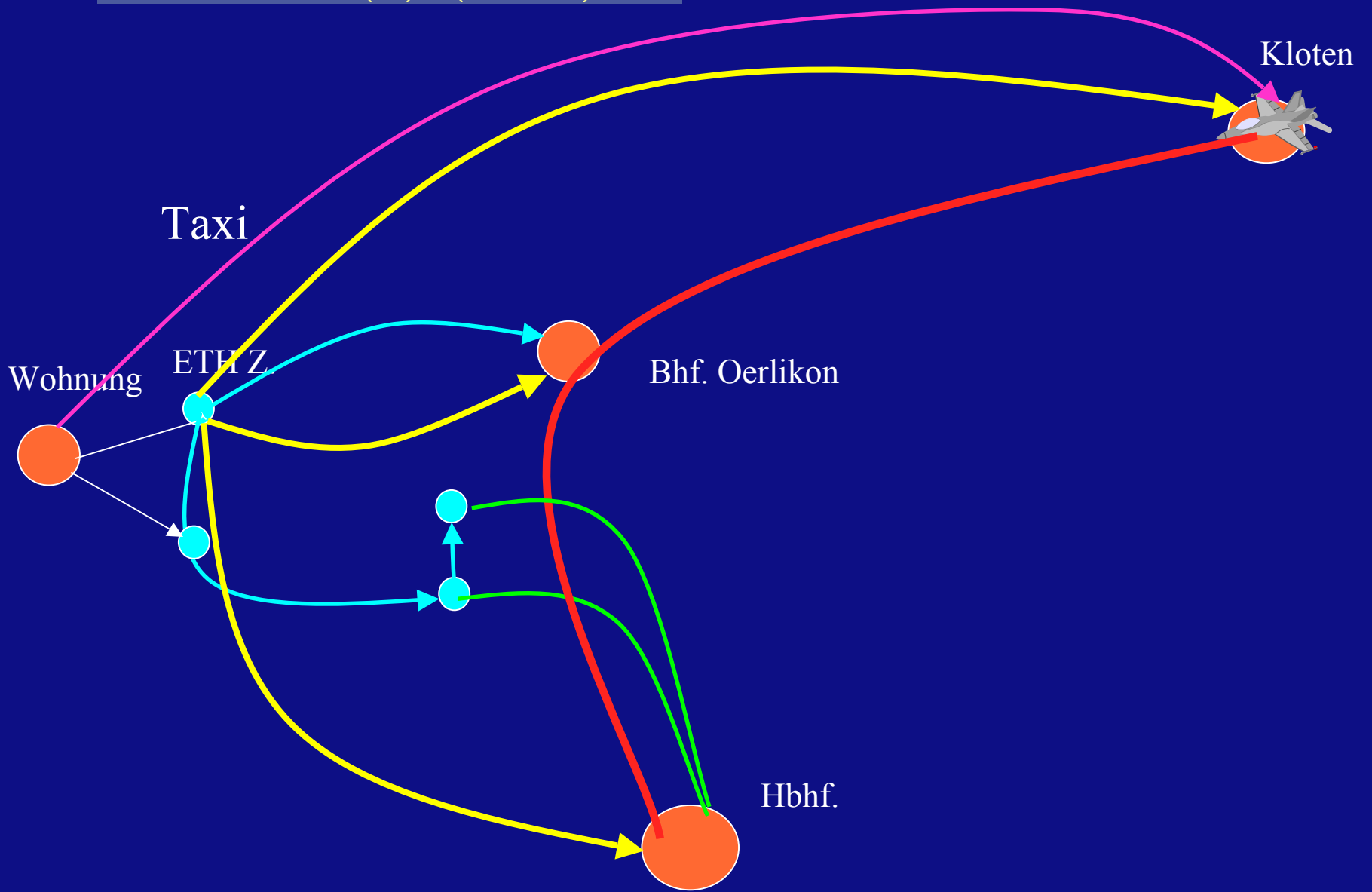
# Route Nr. 4 : Bus, Tram, Bahn



# Routen Nr. 5, 6, 7: Bringen Pkw



# Route Nr (8) (Taxi)



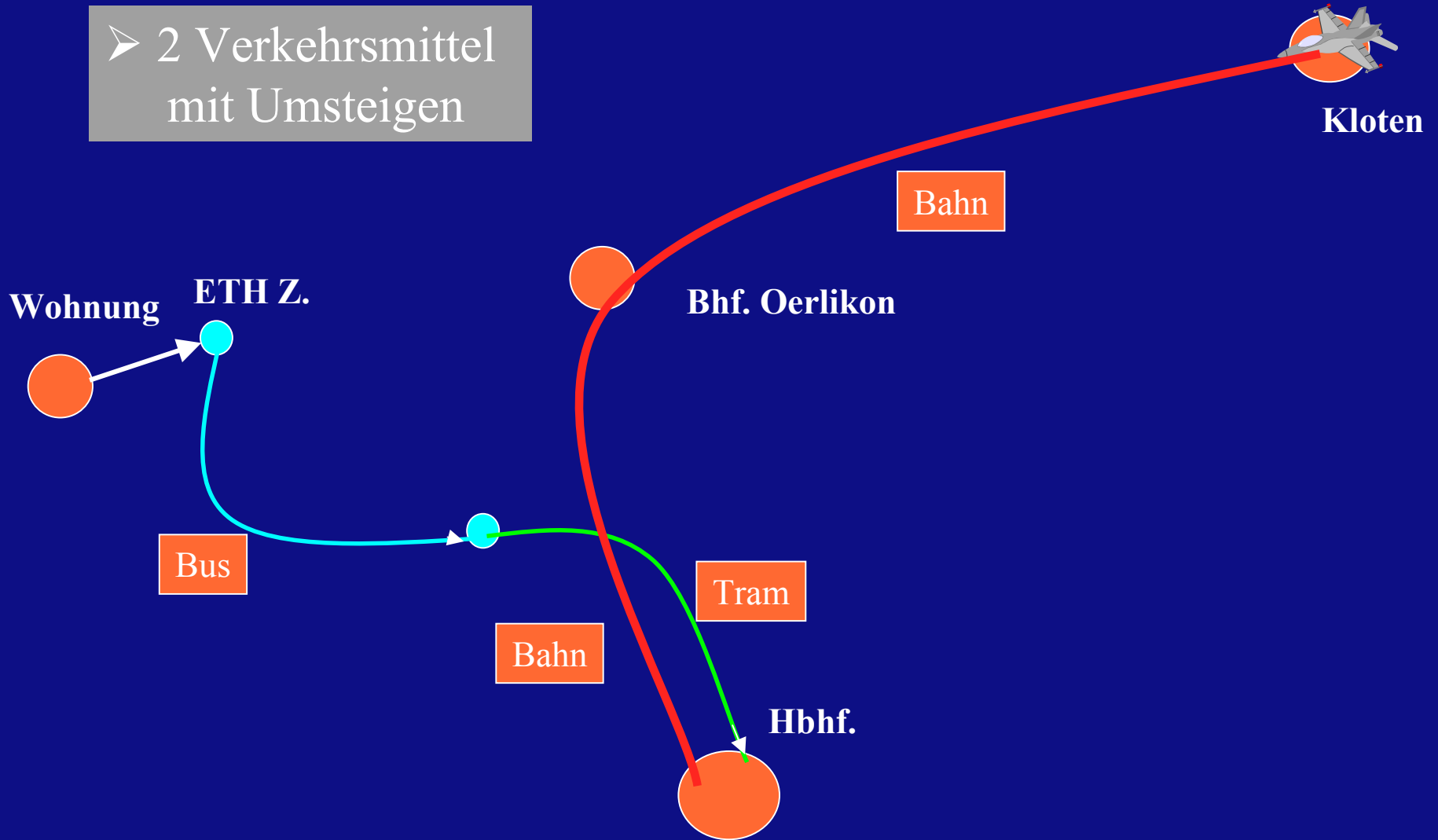
# Was steht Ihnen bevor? → Übersicht

- **Problem Multimodalität und Planungsrelevanz**
- **Empirische Fakten über intermodale Mobilität**
- **Modellierung der komplexen Verkehrsmittelwahl**
- **Geschätzte Verhaltensparameter bei intermodaler Mobilität**
- **Verfahren zur multimodalen Verkehrsanalyse/prognose**
- **Ein neuer Ansatz: Routenwahl in Super/Hypernetzen**
- **Anwendungsbeispiel aus den Niederlanden**



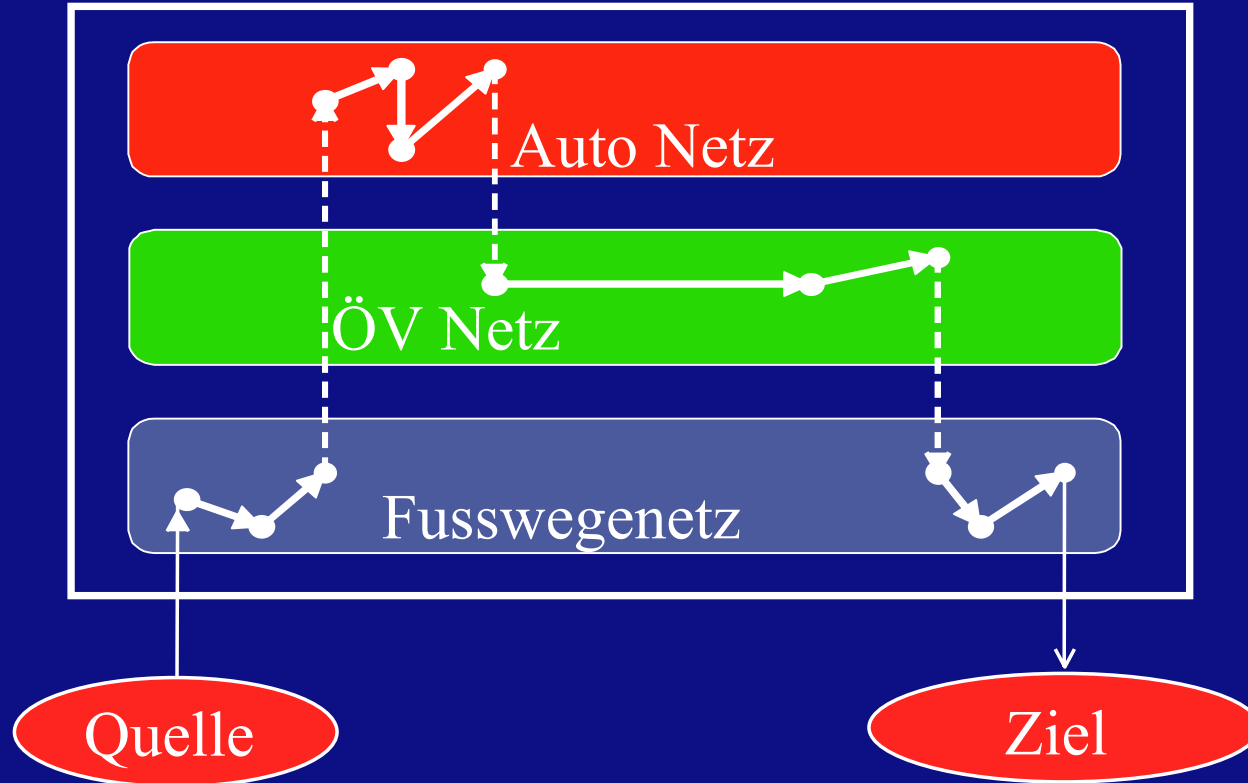
# Definition inter-modaler Weg = Transportkette

- 2 Verkehrsmittel mit Umsteigen



# Intermodale Wege

**Intermodale Wege durchlaufen mehrere unimodale Netze nacheinander, wovon mindestens zwei für mechanisierten Verkehr.**



# Karakteristika intermodaler Wege

- 3% aller Wege (Niederlande) sind IM (4% in Deutschland)**
- > 20% der Wege zu grösseren Städten sind IM**
- 80% der Wege mit der Bahn sind IM**

- 80% der IM Wege sind mit ÖV**
- 60% der IM Wege sind mit der Bahn**

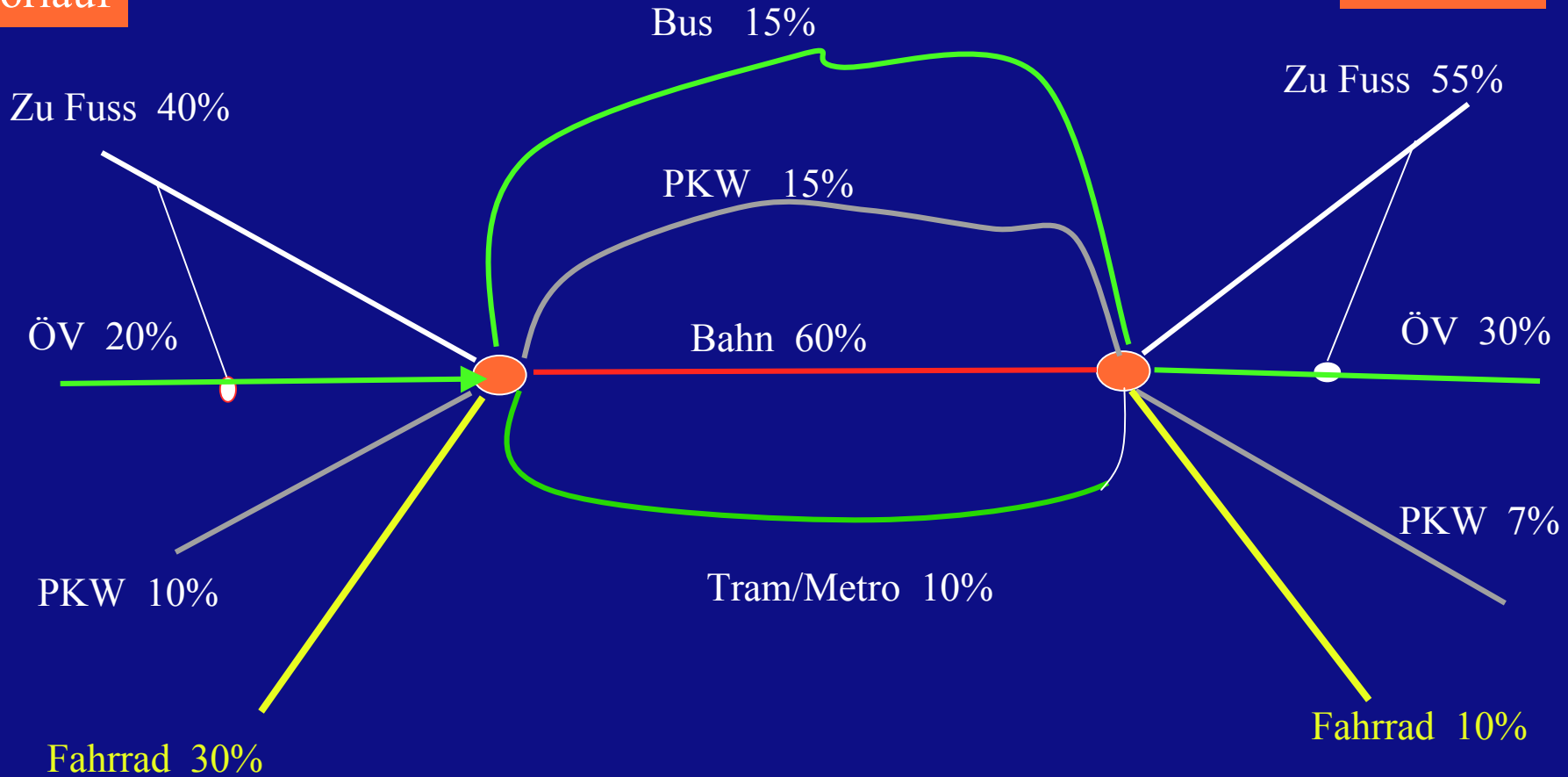
**IM Wege sind vorwiegend: wohnungsgebunden,  
interlokal  
zu grösseren Städten  
zu den Innenstädten  
längere Fahrten  
für Berufs- und Ausbildungsverkehr**

# Verkehrsmittelanteile bei intermodalen Wegen

Vorlauf

Haupttransport

Nachlauf

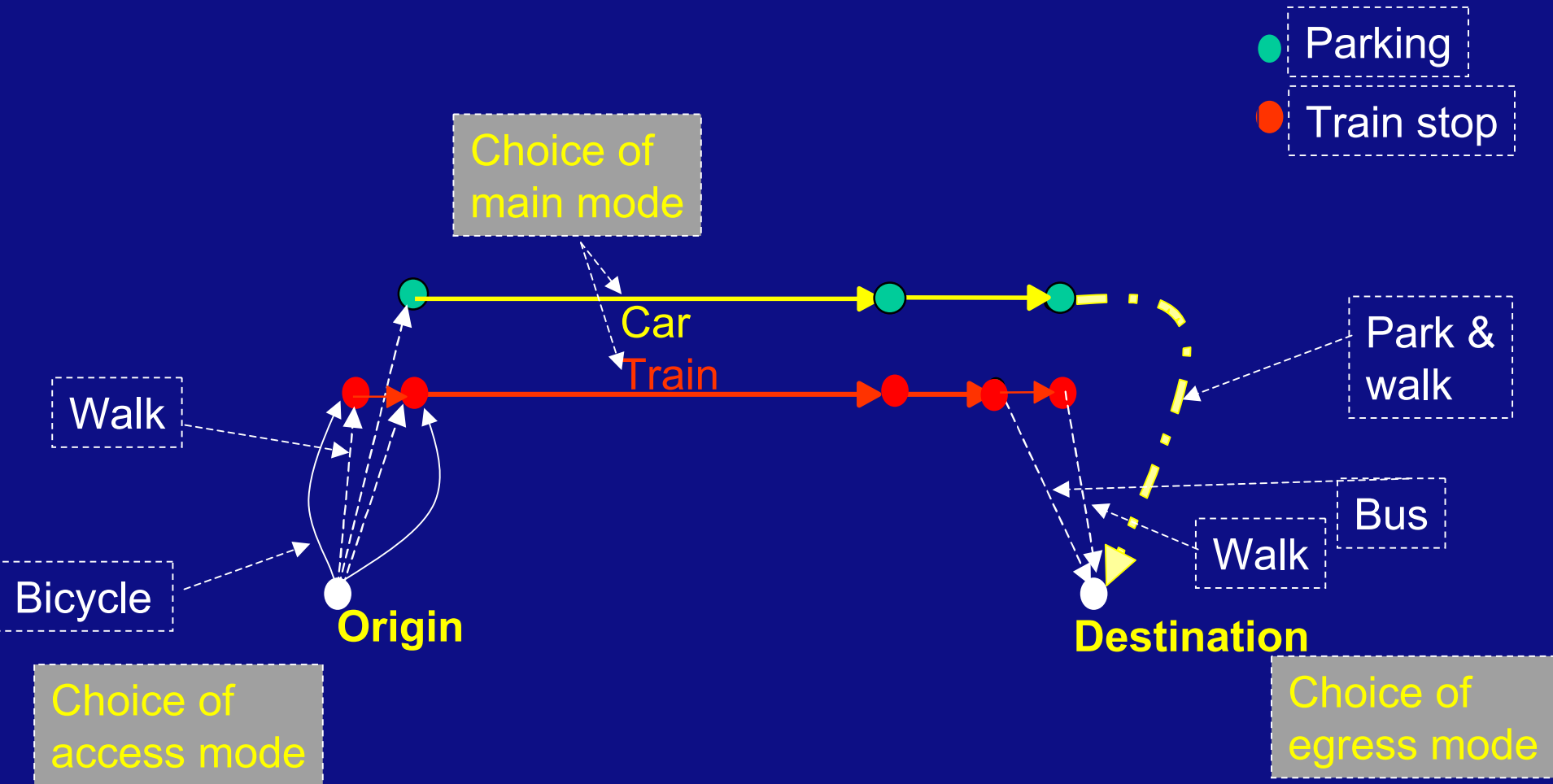


# Planungsrelevanz intermodaler Wege

- **IM Personenverkehr ist Nischenmarkt, dennoch wichtig**
- **IM Personenverkehr wichtig für den ÖV**
- **Park & Ride Vorkehrungen**
- **IM Personenverkehr wichtig für die Städte**

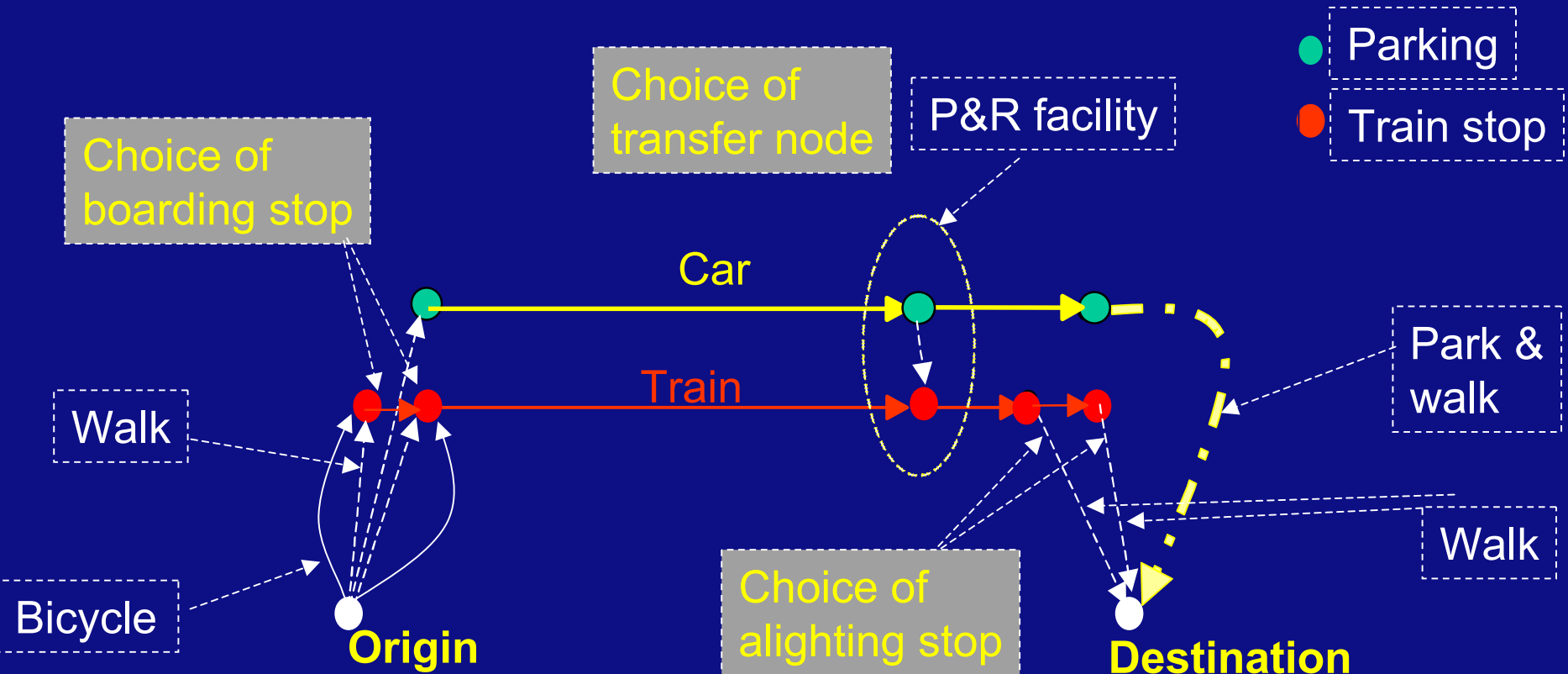
# Multi-modale Entscheidungssituation (1)

Multiple mode choices



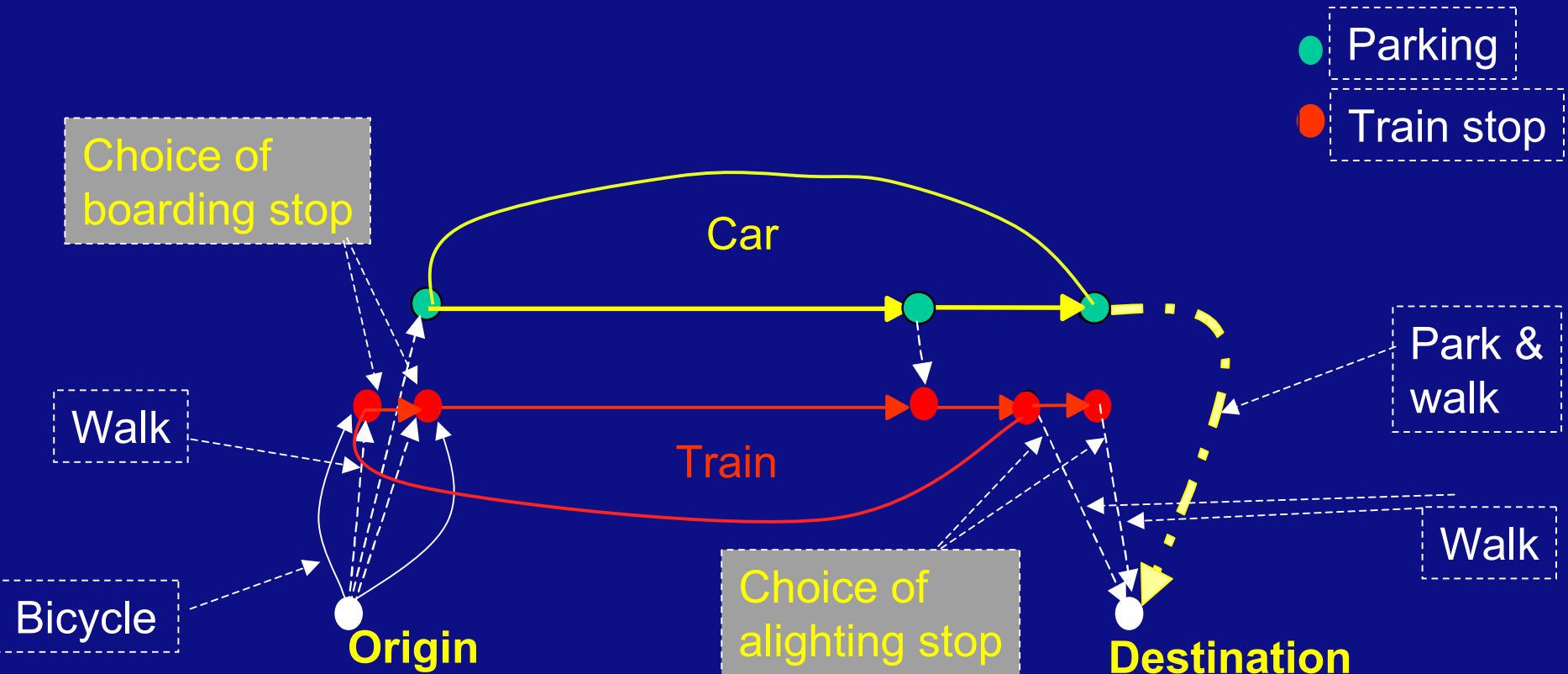
# Multi-modale Entscheidungssituation (2)

Multiple stop choices



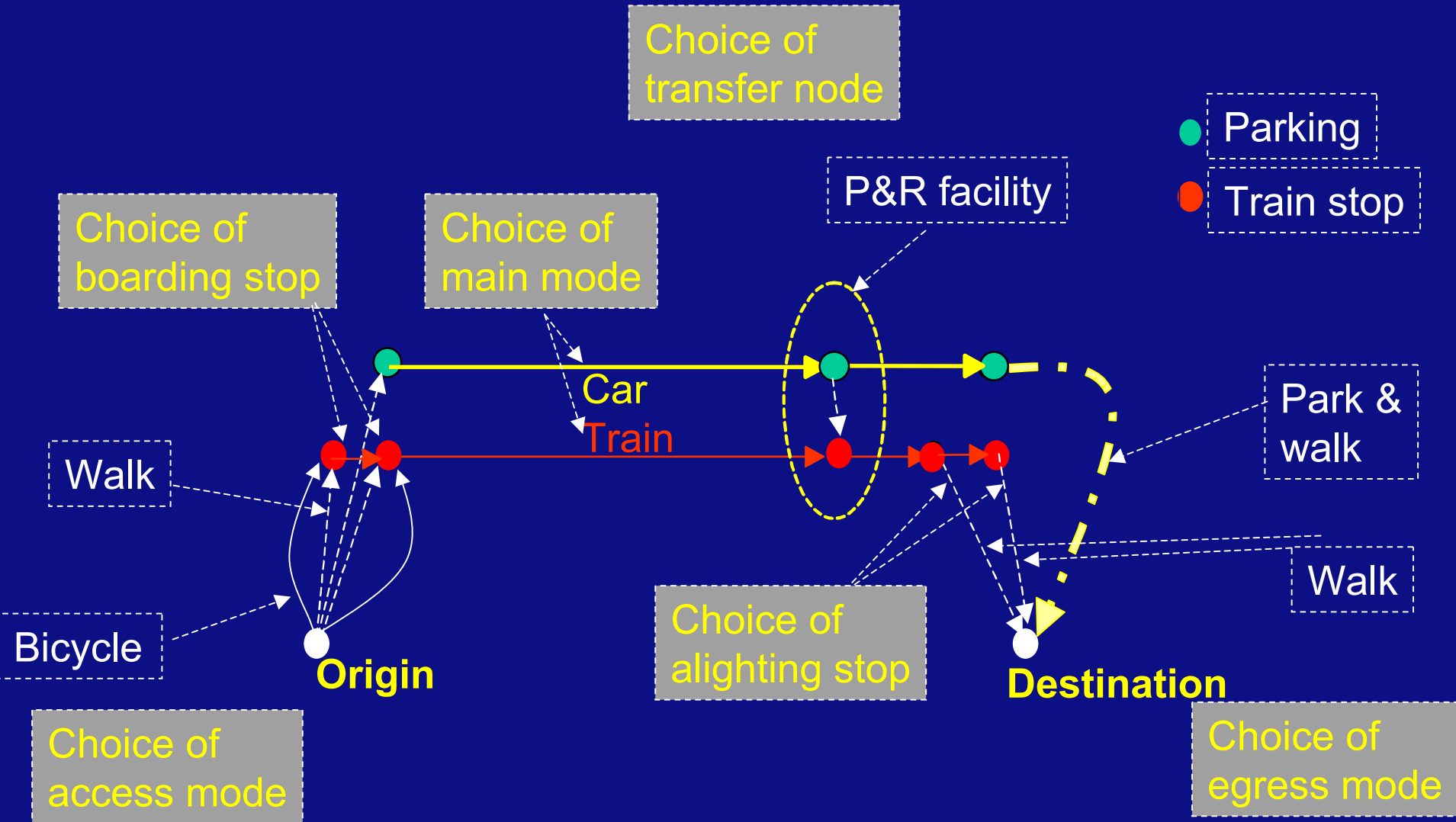
# Multi-modale Entscheidungssituation (3)

Multiple route and train type choices





# Multi-modale Entscheidungssituation



# Empirische Untersuchung der multimodalen Mobilität im Korridor D-R-D-L

Anliegen: Welche Reisealternativen stehen zur Verfügung?  
Wie sieht das Entscheidungsverhalten aus?

Methodik: Wahlbasierte Stichproben: Bahn, Bus, und PKW  
Von jedem Probanden detailliert festlegen der :

1. durchgeführten Reise
2. subjektiven Alternativenmenge !!
3. objektiven Alternativenmenge !!

Anwendung: interregionaler Verkehr (25 – 100 km)

Stichprobenumfang:	Bahn :	1500
	Regionalbus:	200
	PKW:	100

# Verfügbare Reisealternativen intermodaler Wege mit der Bahn (Korridor D-R-D-L)

mit verschiedenen Verkehrsmitteln: 6

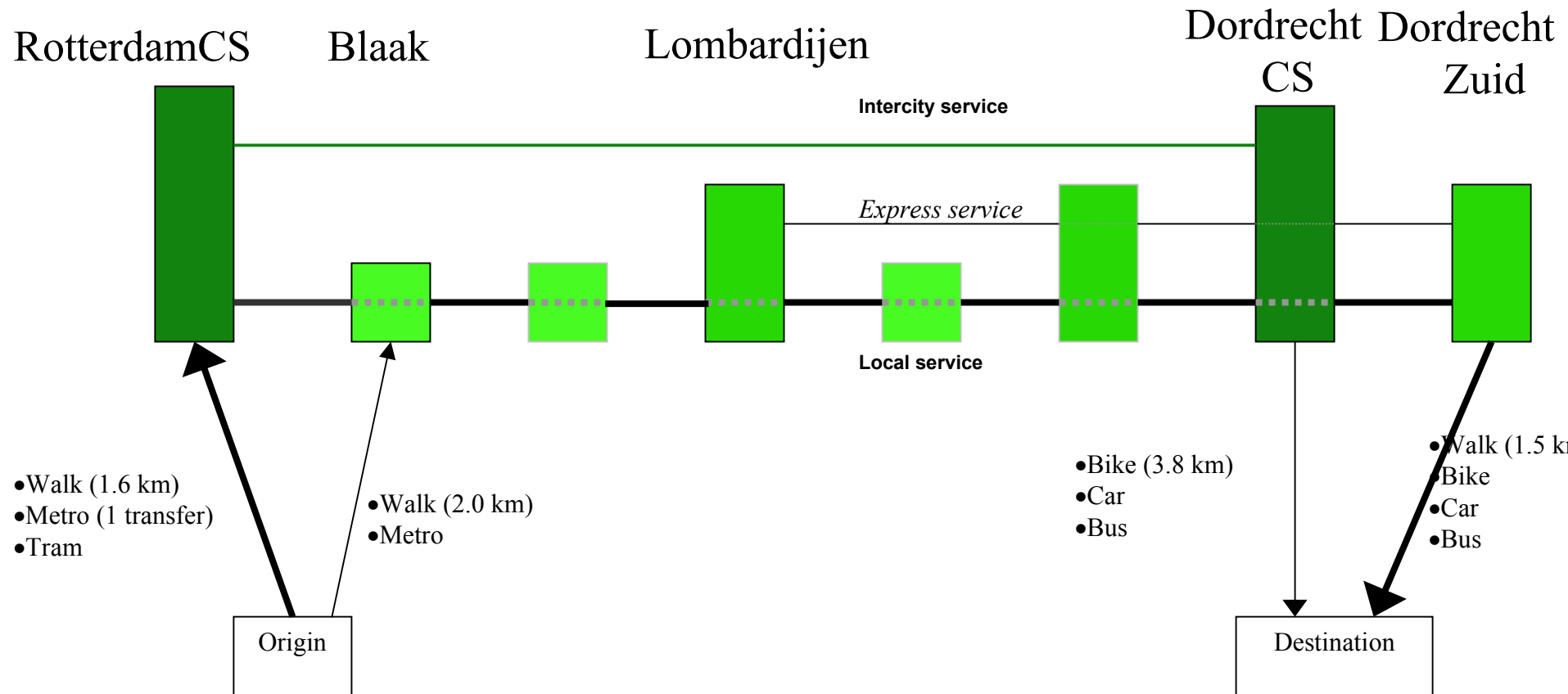


Verschiedene Alternativen: 14 (12)

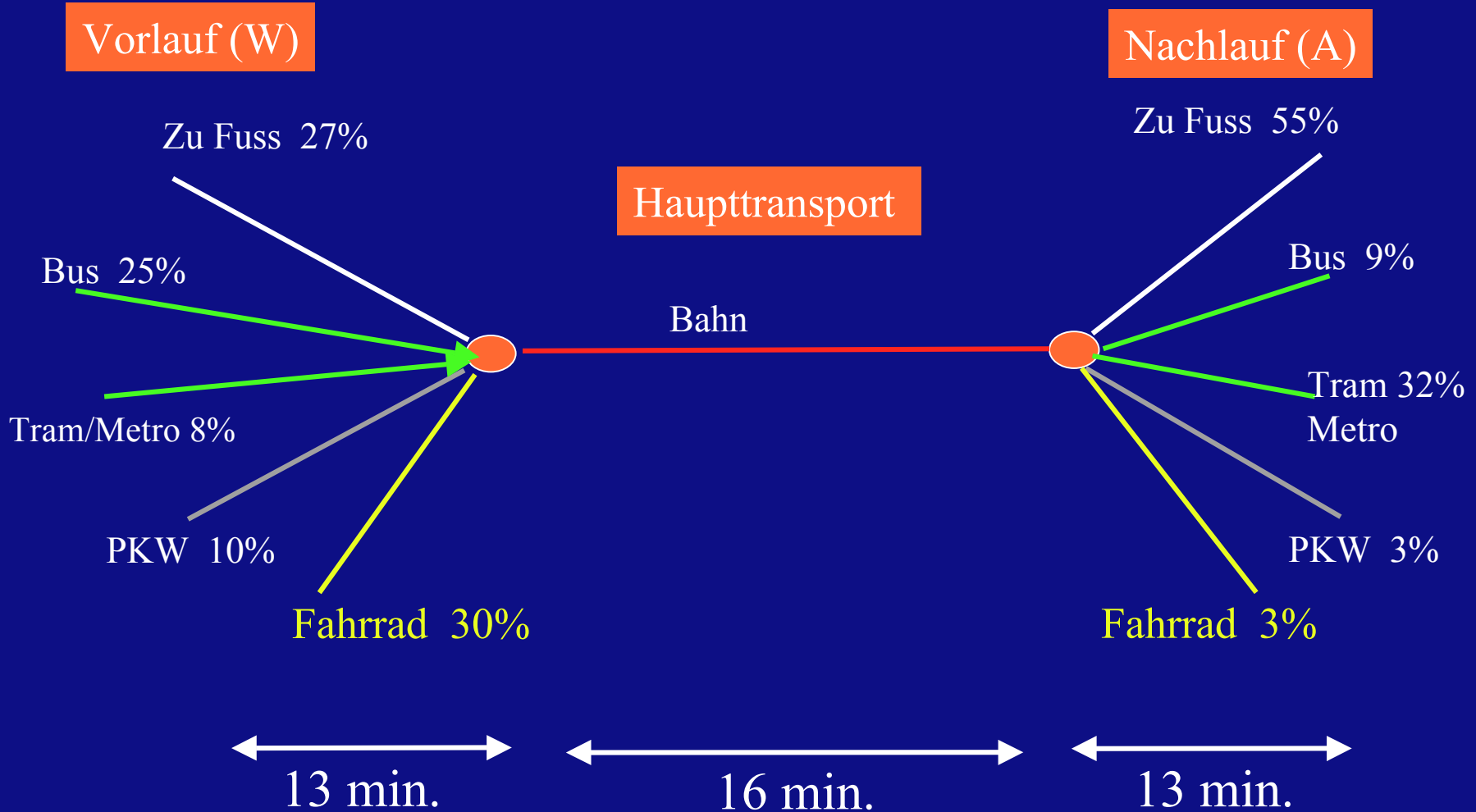
Var: 1 - 62



# Route and mode choice alternatives (62) of respondent 41852



# Verkehrsmittelanteile bei intermodalen Wegen mit der Bahn (Korridor D-R-D-L)



# Relative Gewichte der Zeitkomponenten multi-modaler Wege (Bahnbenutzer)

- **In-Fahrzeug-Zeit Bahn = 1,0**

## **Vor/Nachlaufzeiten:**

- **mit Fuss/Fahrrad/PKW = 1,6**
- **Mit Bus/Tram/Metro = 0,8 !!**
  
- **Wartezeit erste H-Stelle = 2,2**
- **Wartezeit Bahn-Bahn = 2,2**
- **Gehzeiten (alle) = 2,0**

(Vor/Nachlaufgewichte sind gleich)

# Relative Gewichte der Zeitkomponenten multi-modaler Wege (Bahnbenutzer)

**Umsteige-Penalty (in Minuten IFZ Bahn):**

**(Alle ÖV-Kombinationen)**

**Umstieg auf kurze Folgezeit = 5,7 min**

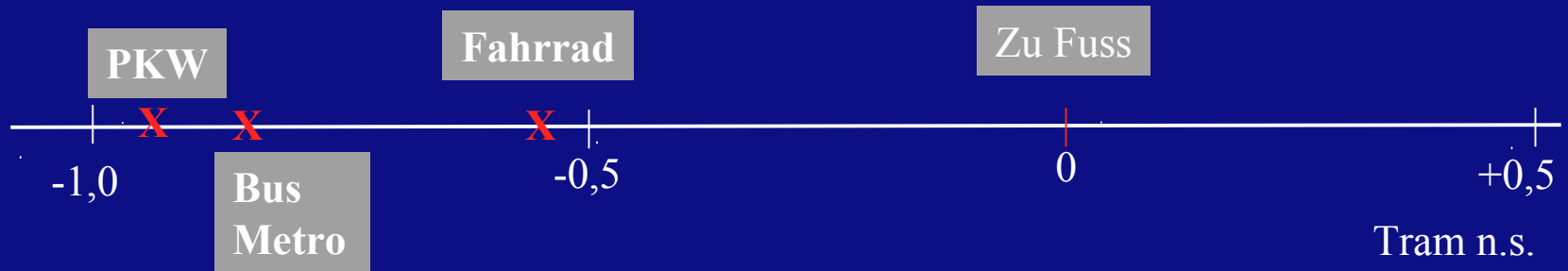
**Umstieg auf lange Folgezeit = 11,4 min**

**(Kurz = < 10 min.)**

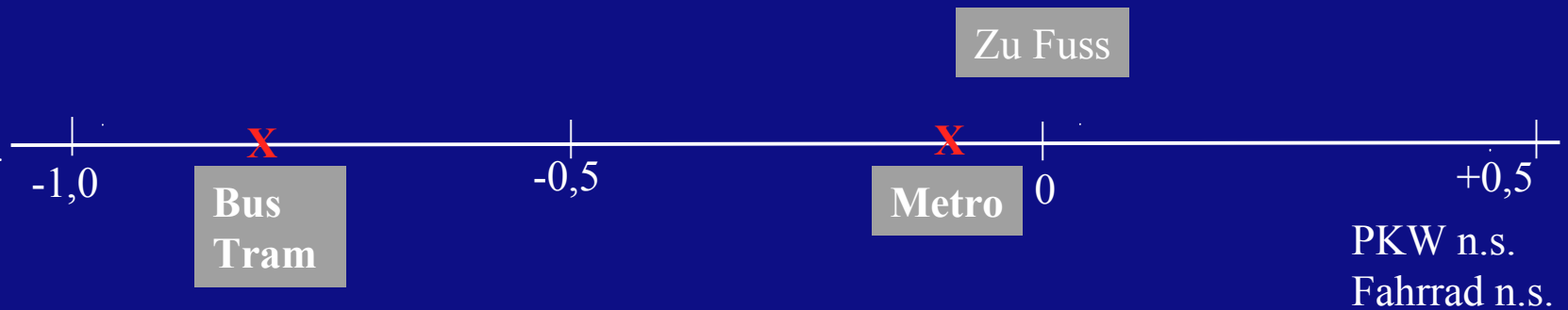
# Verkehrsmittelspezifische Konstanten des Vorlaufs und Nachlaufs (Bahnreisende)

Geschätzt mit NL-4

## Wohnungsseite



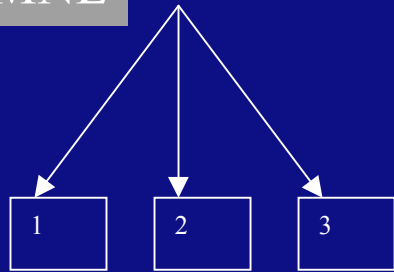
## Aktivitätenseite



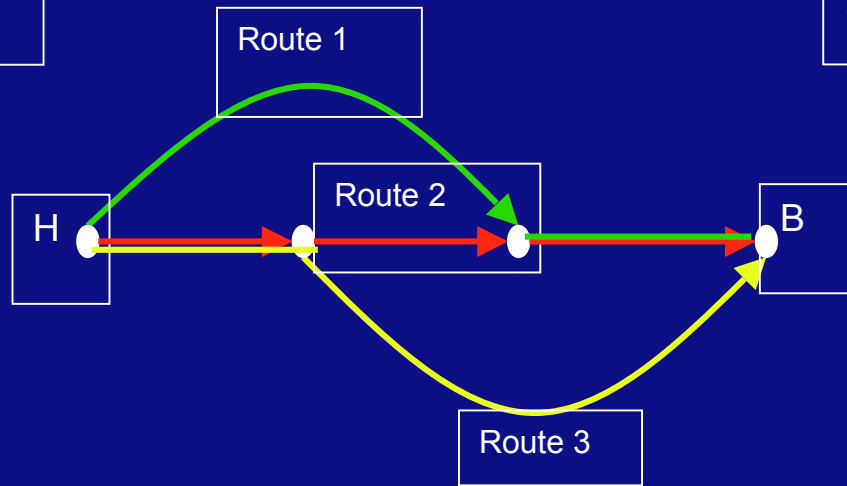
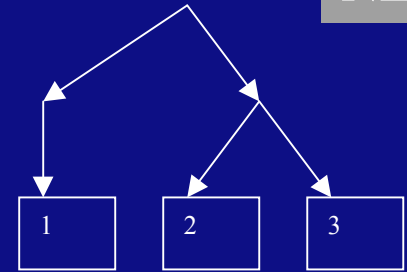


# Entscheidungsmodellstrukturen für multimodale Wege

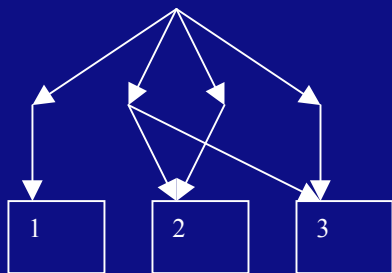
MNL



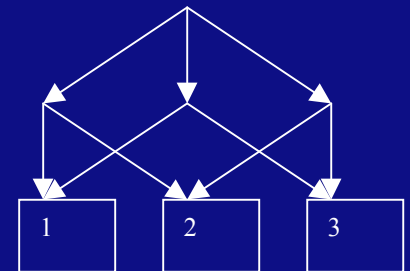
NL



CNL oder PD

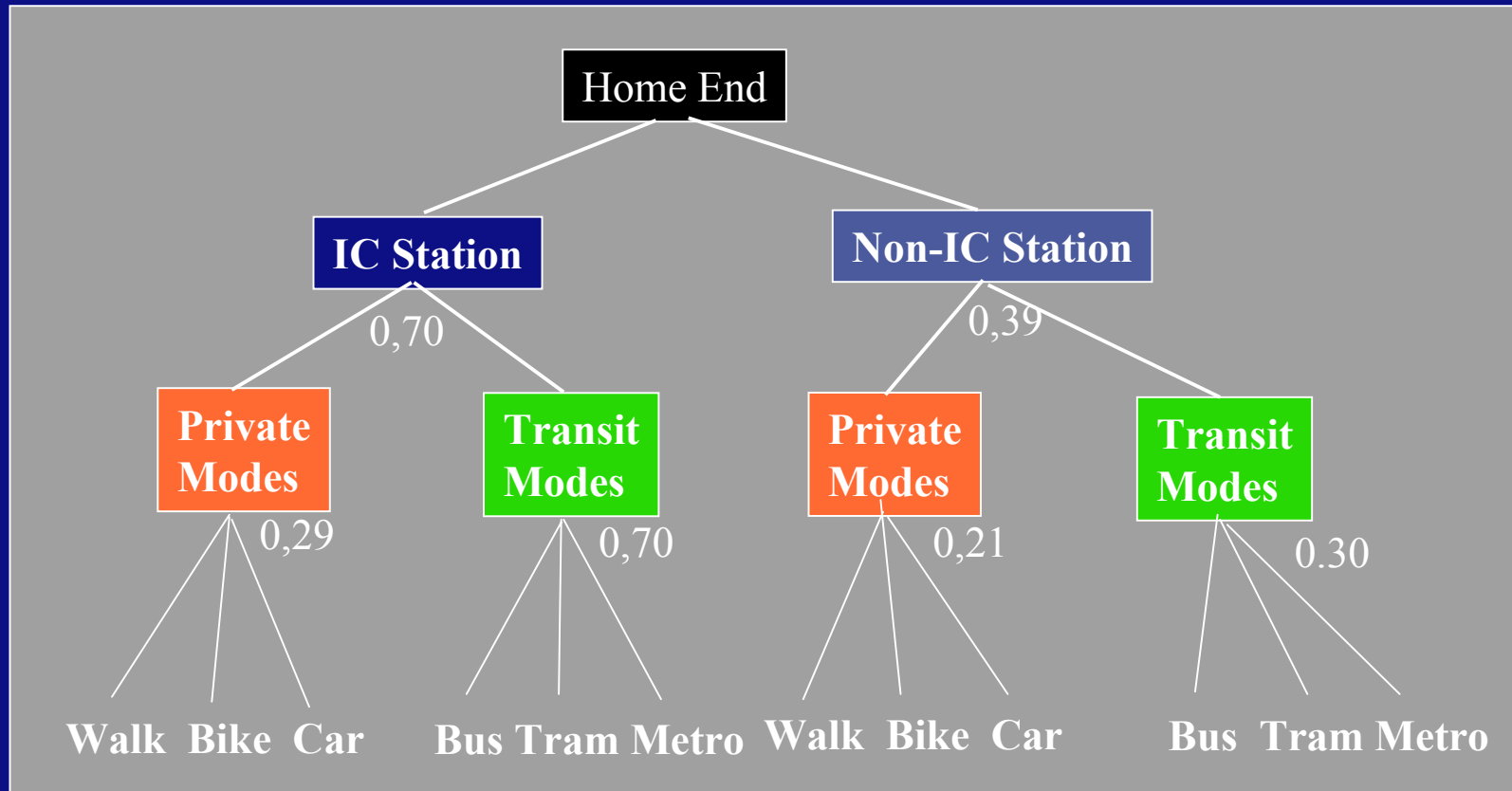


PCL



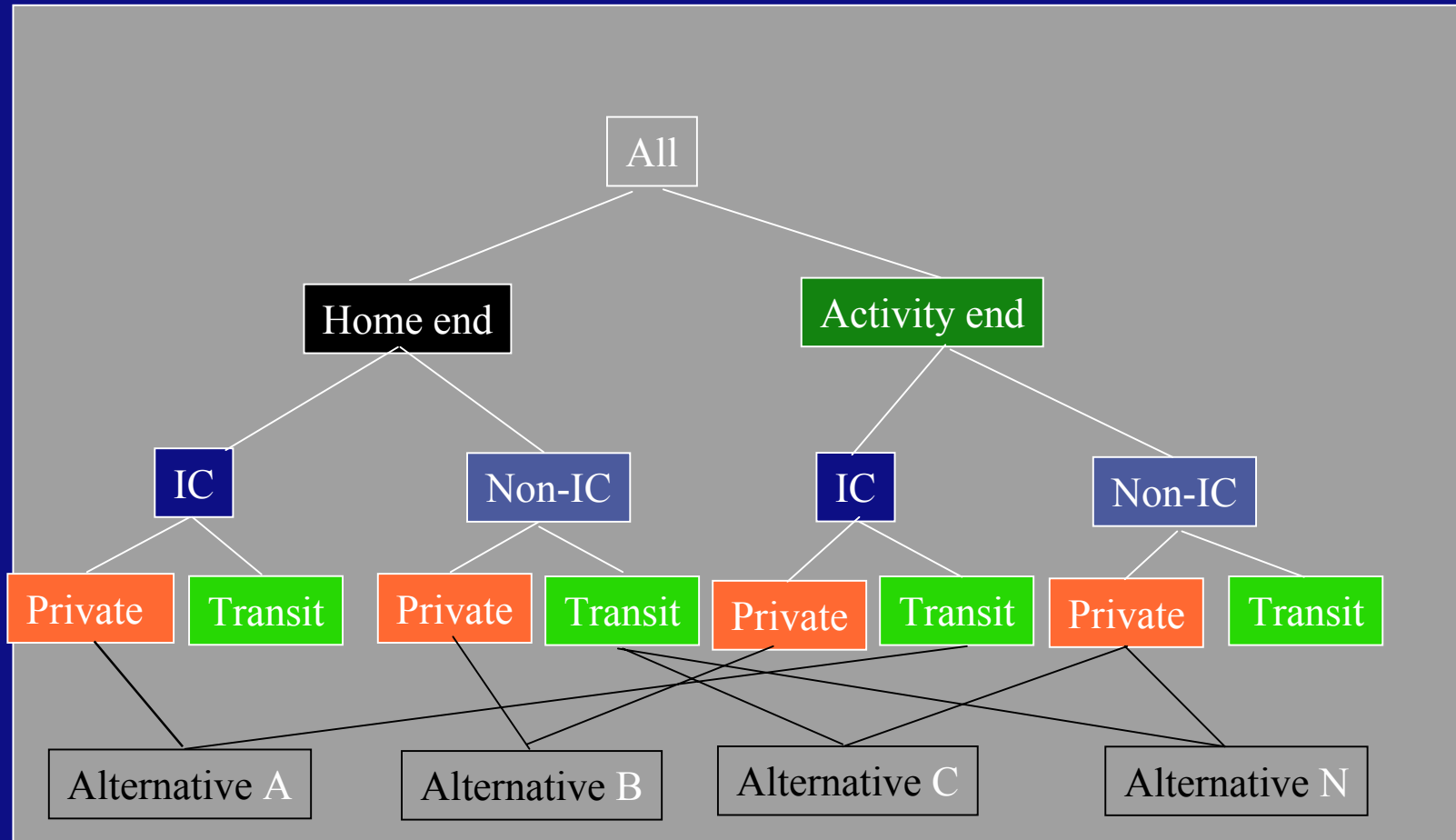
# Nest-Struktur multi-modaler Wege der Bahnbenutzer (Optimales NL-Modell)

Geschätzt mit NL-4

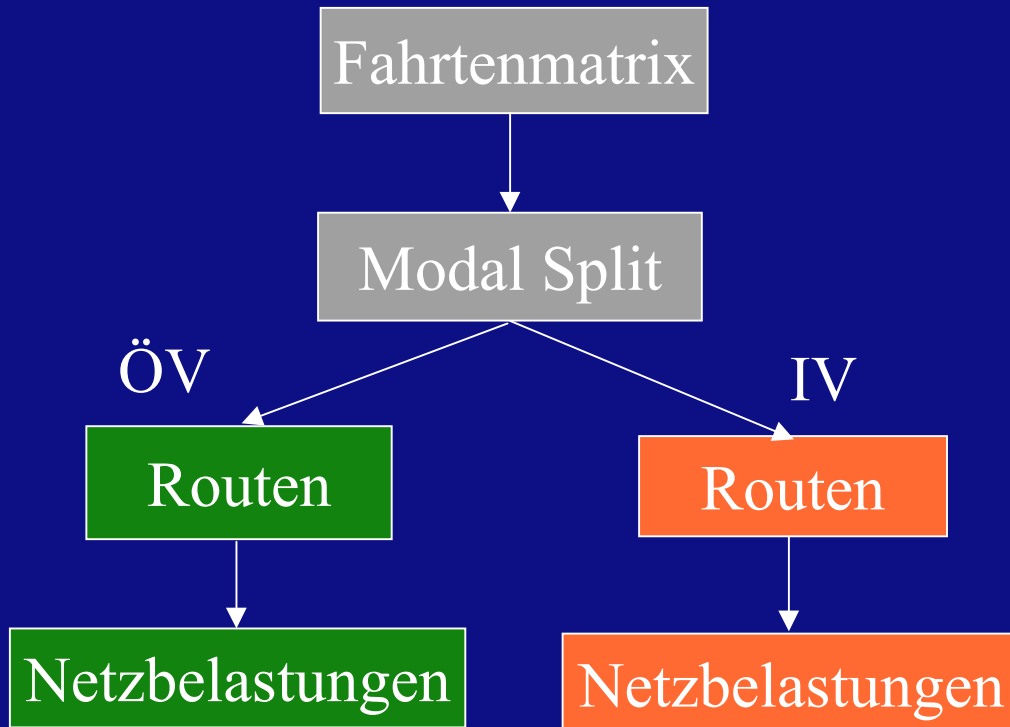


0,xx = logsum Parameter

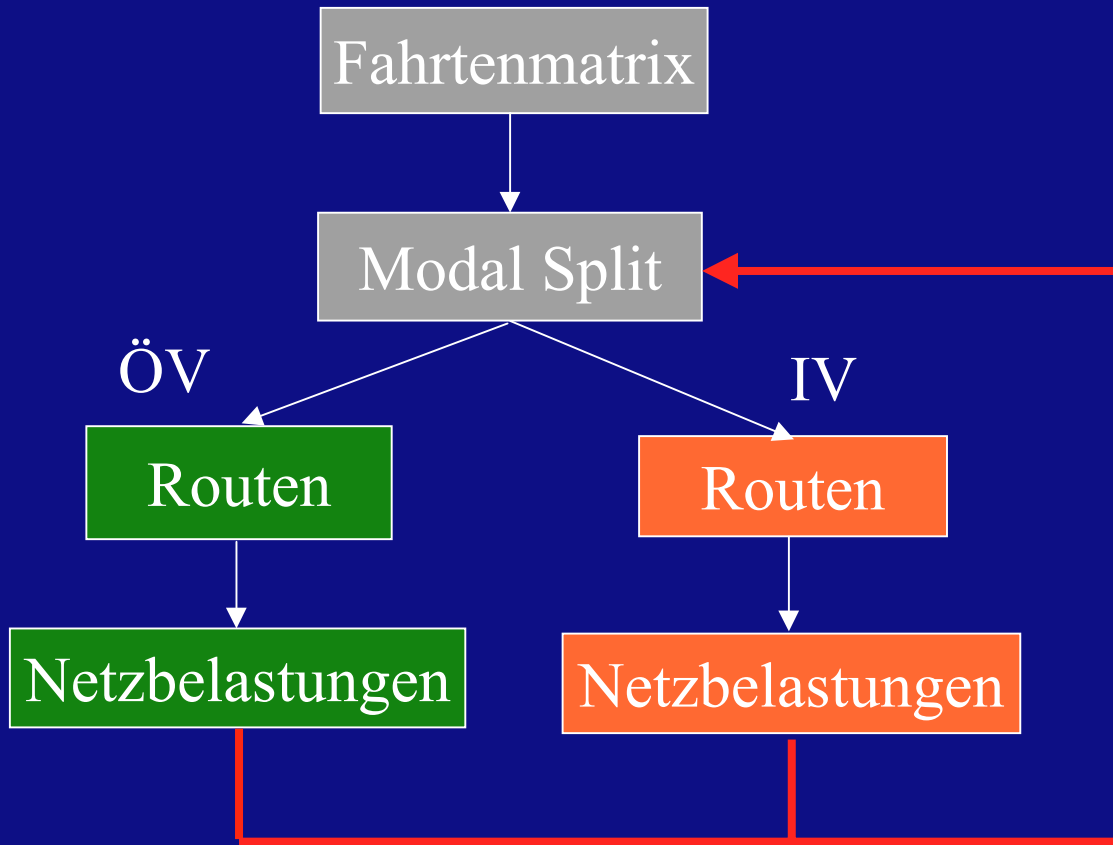
# Erweiterte Nest-Struktur multi-modaler Wege der Bahnbenutzer (CNL- oder PD-Modell)



# Multi-modale Analyse/Prognoseverfahren



# Multi-modale Analyse/Prognoseverfahren

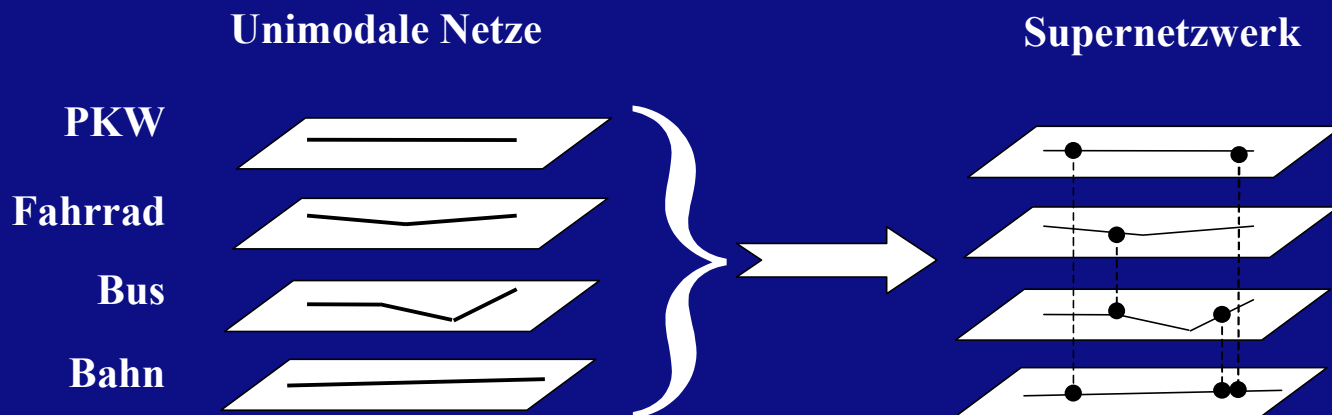


# Übersicht möglicher multimodaler Verfahren

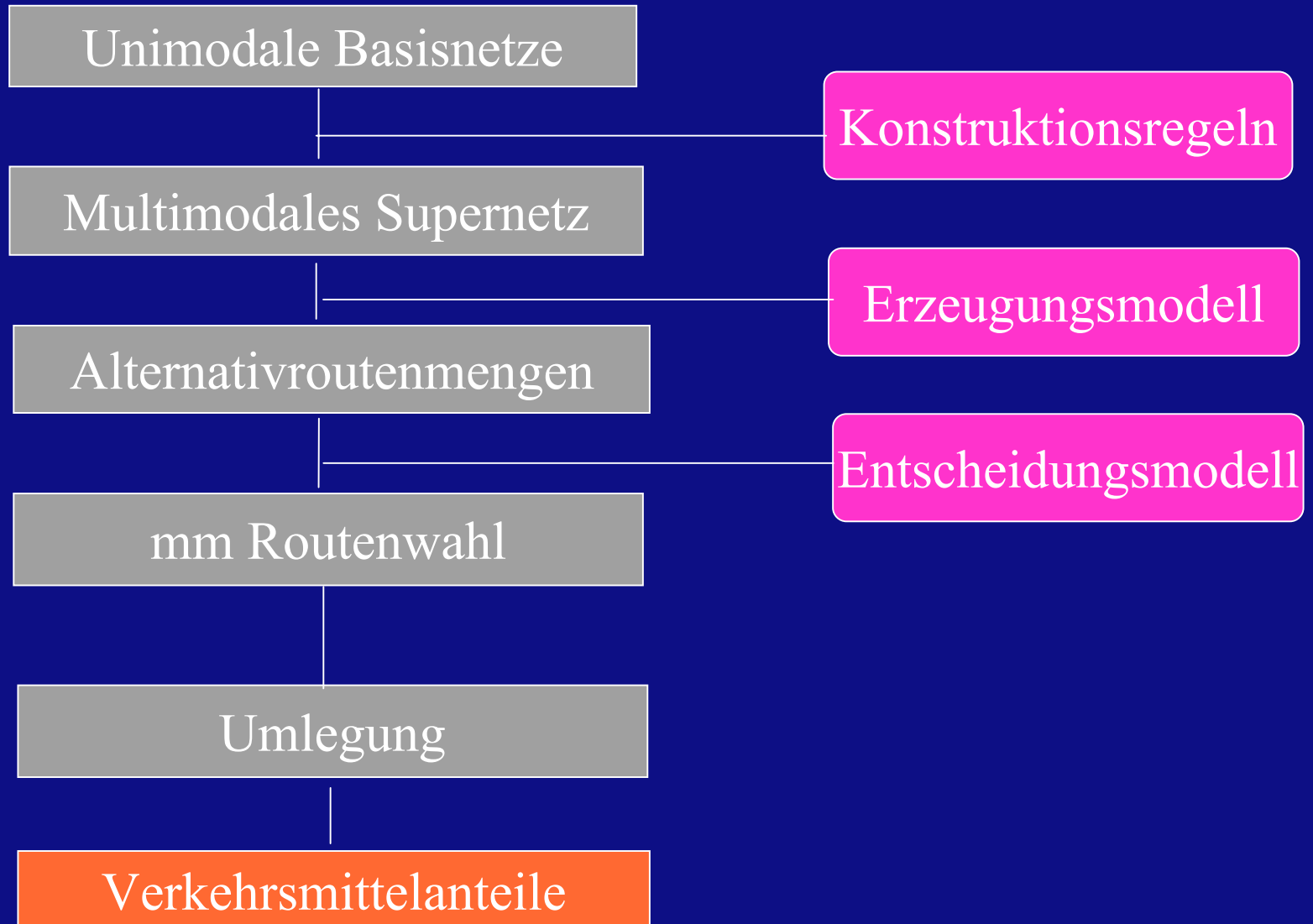
Modeltyp Eigenschaft	Unimodal classic	Multi- modal	Multimodal extended	Intermodal fixed	Intermodal free
<b>Mode/route split</b>	<b>sequentiell</b>	<b>sequent.</b>	<b>simultan</b>	<b>sequentiell</b>	<b>simultan</b>
<b>Belastungs- feedback ?</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>
<b>Modale Netze</b>	<b>getrennt</b>	<b>getrennt</b>	<b>gekoppeld</b>	<b>getrennt</b>	<b>integriert</b>
<b>combined modes ?</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>
<b>Mixed modal flows ?</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>nein</b>
<b>Route choice</b>	<b>determin.</b>	<b>det.eq.</b>	<b>stochastic</b>	<b>det.equil.</b>	<b>stochastic</b>

# Supernetzwerk?

Ein *Supernetzwerk* ist aufgebaut als eine Kombination von unimodalen Netzen mit Verbindungsstrecken dazwischen, so dass unterschiedliche Entscheidungen gemeinsam als eine Routenwahl im Supernetzwerk modelliert werden können.



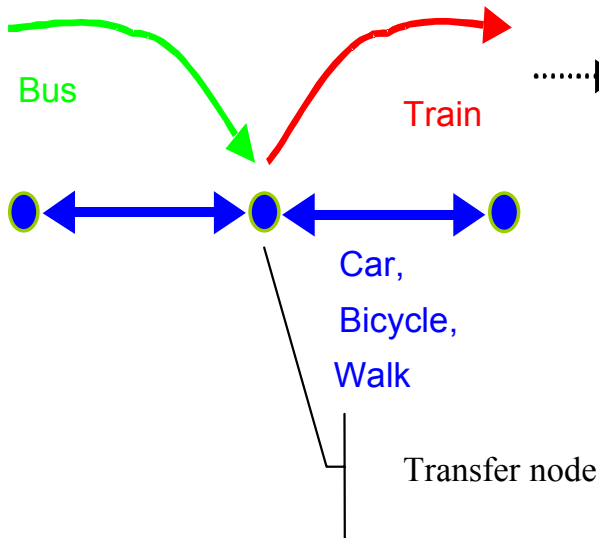
# Verfahren der Verkehrsanalyse im multimodalen Supernetz



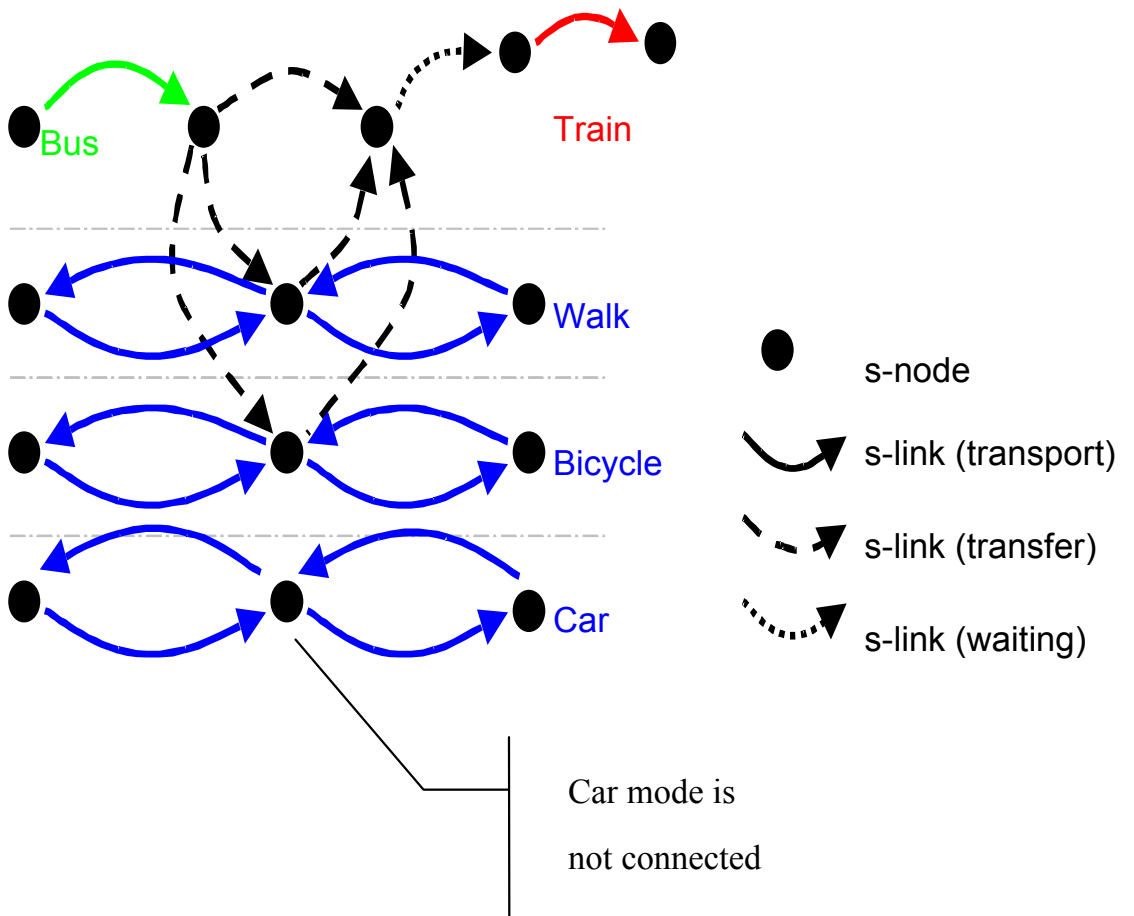


# Methodik der automatischen Supernetz Konstruktion

Base network



Supernetwork



# Erzeugung der Alternativroutenmengen

Anwendung nutzerspezifischer Widerstandsfunktionen

Verfahren zur Erzeugung von Routenmengen :

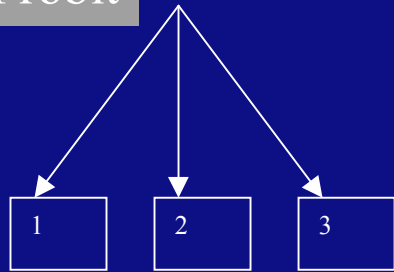
- + Stochastische Simulation kürzester Routen
- + Constrained K-shortest paths generation (deterministic)  
( Form, Umweg, Reihenfolge, etc)
- + Labelled shortest paths

# Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten

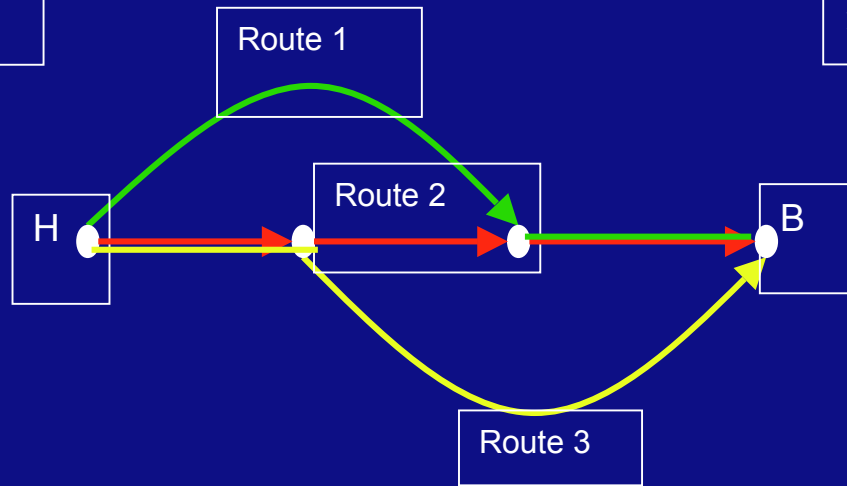
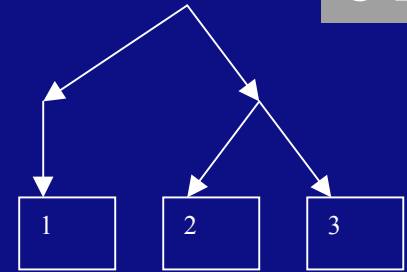
- **Ausgangspunkt: → mehrere Benutzergruppen mit verschiedenen Widerstandsfunktionen**
- **Teil-Überlappung der Routen verlangt Berücksichtigung**
- **Ähnlichkeiten der Widerstände und Routen verlangt Mehrwegansatz**
- **Paired Combinatorial Logit (PCL) verglichen mit Probit und MNL: → PCL angewendet**

# Entscheidungsmodellstrukturen für multimodale Wege

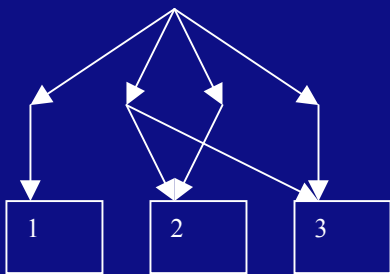
Probit



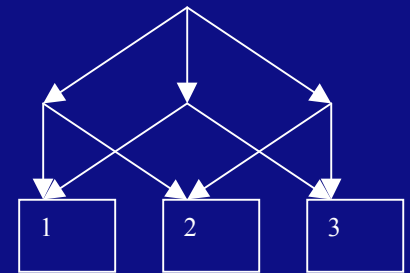
C-Logit



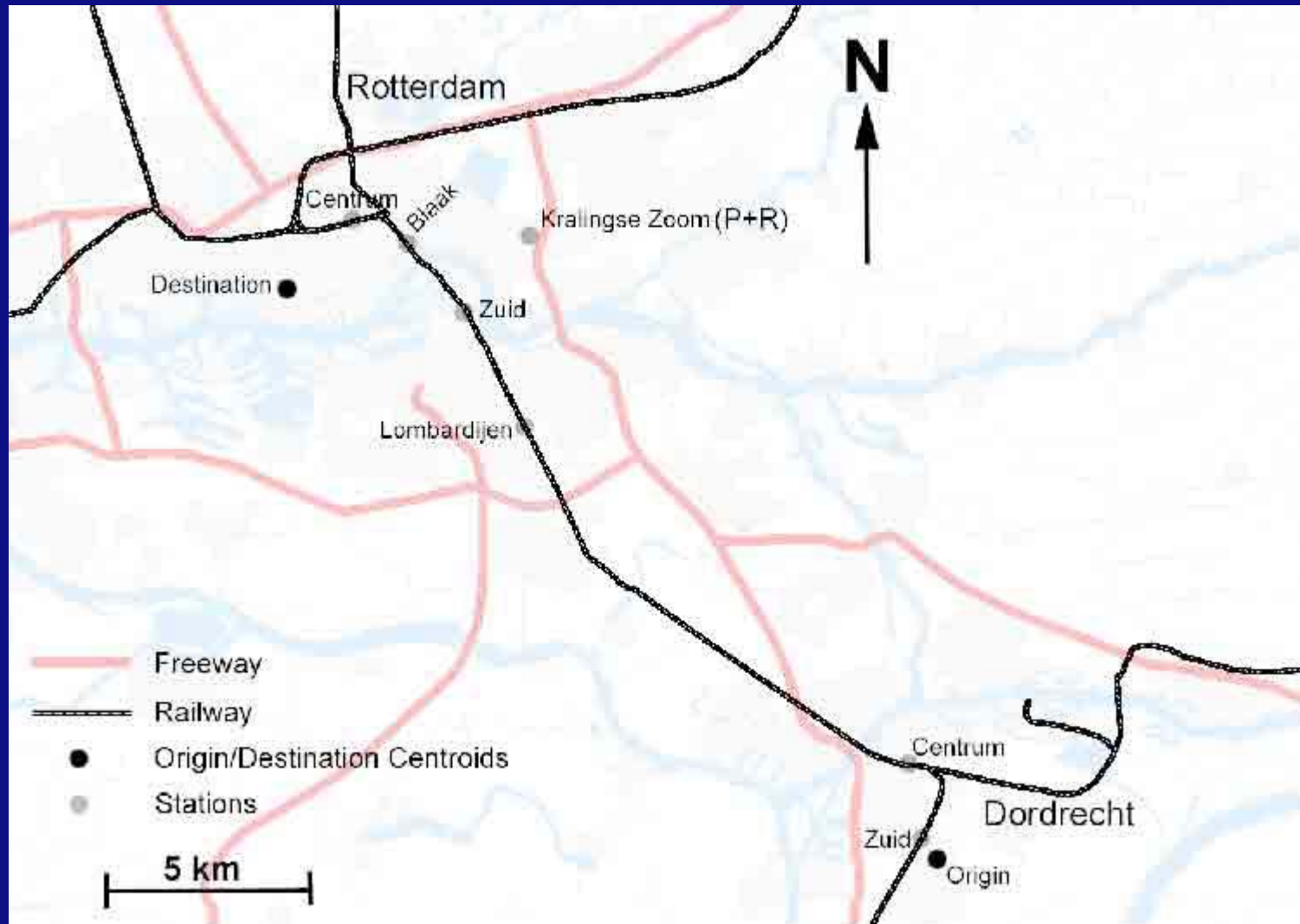
CNL oder PD



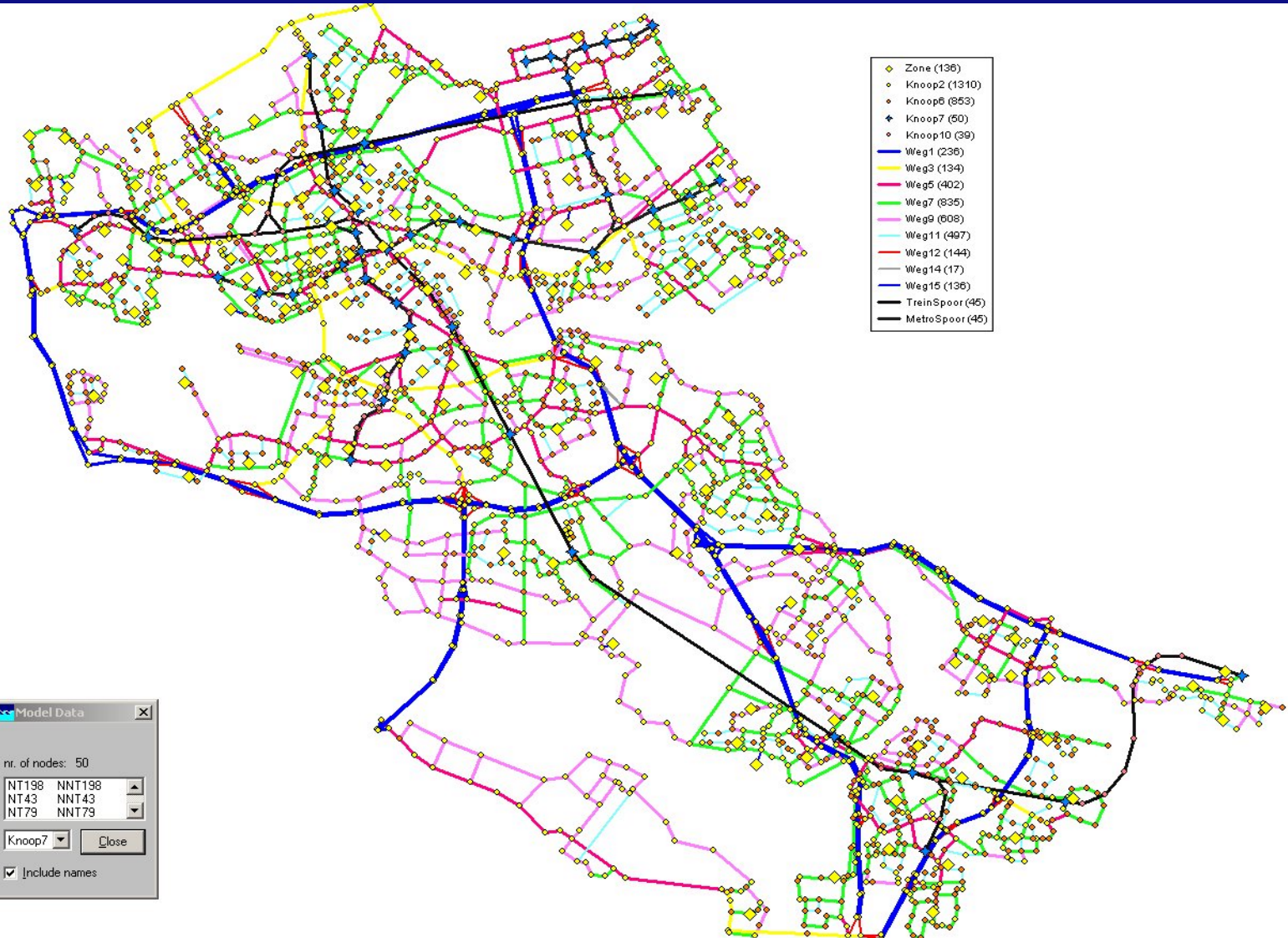
PCL



# Hauptverbindungen Korridor Rotterdam-Dordrecht



# Netzmodell Korridor Dordrecht-Rotterdam



# Vergrößerung des Supernetzmodells

## Base network

**Knoten** 2,388

Transfer nodes 903

Centroids 136

**Strecken** 3,099

ÖV-Linien 134

Bus 66

Tram 99

Metro 4

Bahn 55

ÖV Lin.-Segmente 2744

## Supernetwork

**Knoten** 5,836 **X 2,4**

**Strecken** 22,498 **X 7,3**

Fahrstrecken 19,631

PKW 3,454

Fahrrad 3,984

zu Fuss 3,984

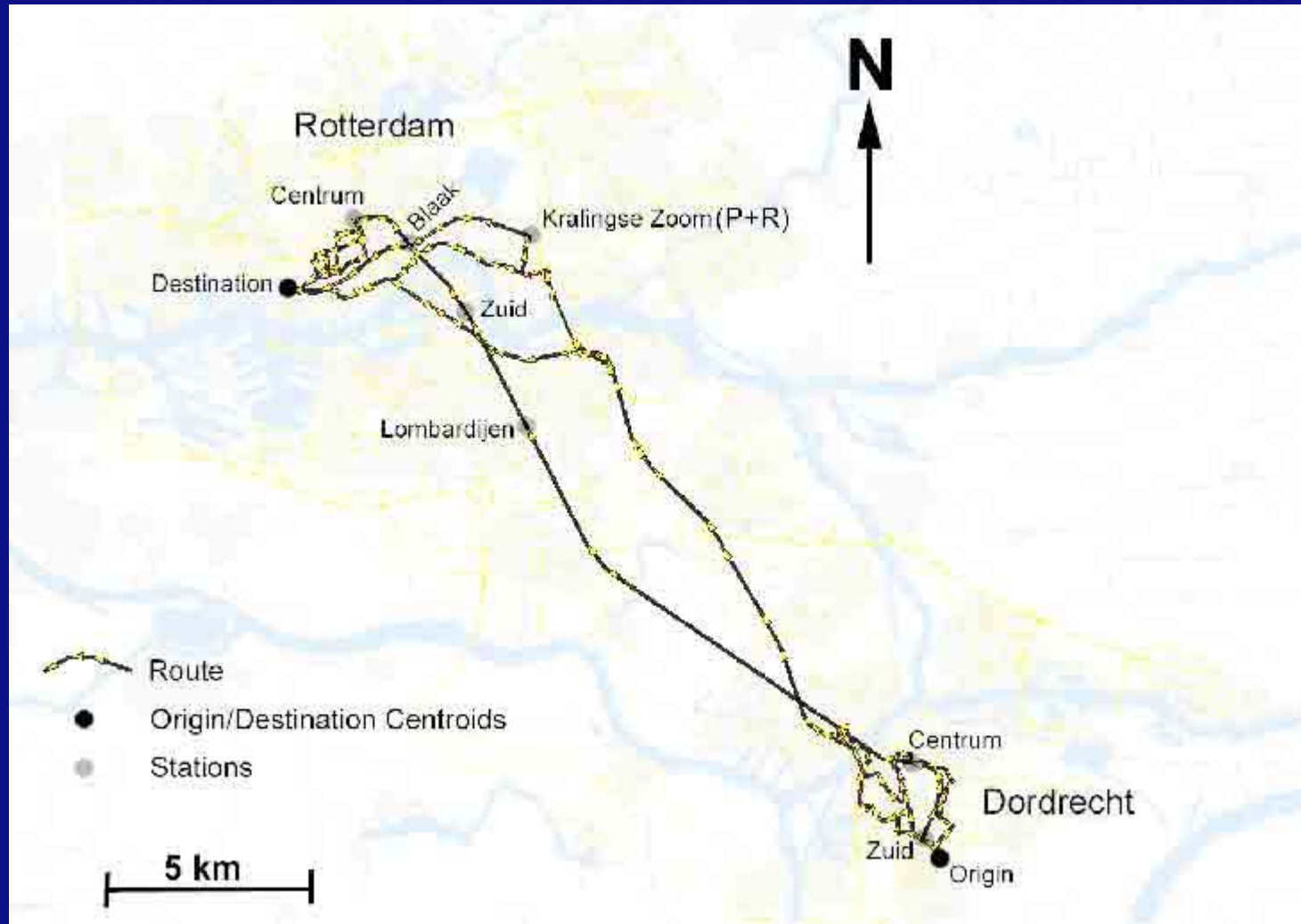
ÖV 8,209

Umsteigstrecken 1,884

Wartestrecken 983

Factor

# (Multi)modale Wegemöglichkeiten einer Q-Z Beziehung im Korridor D-R





# Karakteristika der generierten Alternativenmenge

Dordrecht Centrum - Alexander

Kategorie Hauptmodus	Anzahl Routen	Vorlauf- Modi	Nachlauf- Modi	Reisezeit (min)
PKW	3	--	P+R	27 - 37
Bahn - Bahn	6	}	Metro	43 - 58
			Fuss	
Bahn - Metro	8		Fuss	50 - 62
			Fahrrad	
Bus	8			54 - 70

Insgesamt | 25

# Karakteristika der generierten Alternativenmenge

Dordrecht Stadspolders – Rotterdam Spangen

Kategorie Hauptmodus	Anzahl Routen	Vorlauf- Modi	Nachlauf- Modi	Reisezeit (min)
PKW	7	--	P+R	38 – 61
Bahn - Bahn	6	PKW Bus	Metro Fuss	52 – 90
Bahn - Metro	4	Fuss Fahrrad	Fahrrad Tram	60 – 98
Bus	2	Fuss Fahrrad		78 – 104
Insgesamt	19			

# Entscheidungsmodell (PCL)

## Paired Combinatorial Logit

$$P_i = \sum_{j \neq i} P_{i|ij} P_{ij}$$

$$P_{i|ij} = \frac{\exp\left(\frac{\mu V_i}{1 - \sigma_{ij}}\right)}{\exp\left(\frac{\mu V_i}{1 - \sigma_{ij}}\right) + \exp\left(\frac{\mu V_j}{1 - \sigma_{ij}}\right)}$$

$$P_{ij} = \frac{(1 - \sigma_{ij}) \left( \exp\left(\frac{\mu V_i}{1 - \sigma_{ij}}\right) + \exp\left(\frac{\mu V_j}{1 - \sigma_{ij}}\right) \right)^{1 - \sigma_{ij}}}{\sum_{k=1}^{n-1} \sum_{m=k+1}^n (1 - \sigma_{km}) \left( \exp\left(\frac{\mu V_k}{1 - \sigma_{km}}\right) + \exp\left(\frac{\mu V_m}{1 - \sigma_{km}}\right) \right)^{1 - \sigma_{km}}}$$

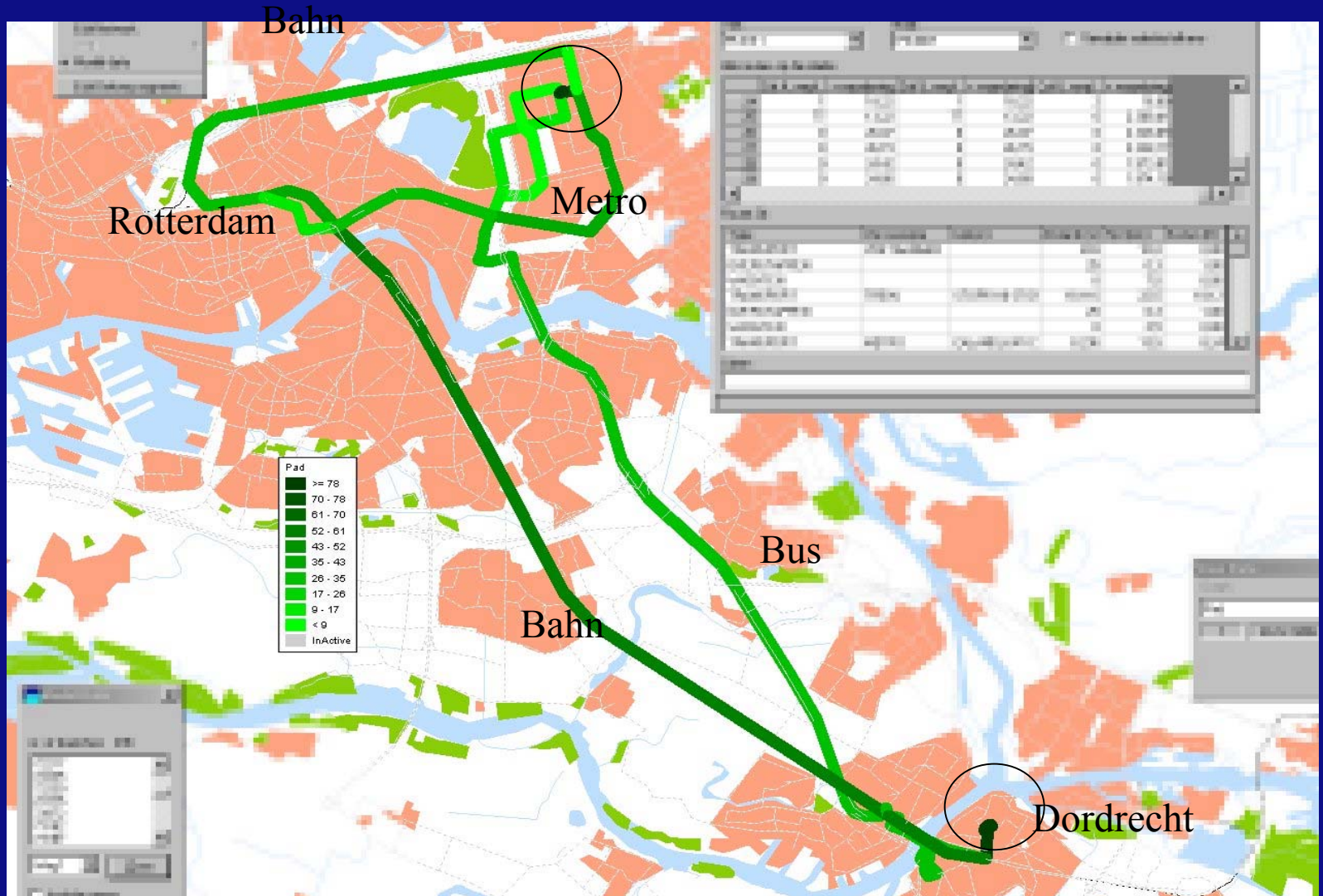
# Aufbau generierter Routen

Nr	Modes used and the related distances travelled										Total	
	Access		Main				Egress					
	Mode	Dist	Mode	Dist	Mode	Dist	Mode	Dist	Mode	Dist	Dist	Time
1					<b>Car</b>	26.0					26.0	35.3
2					<b>Car</b>	24.9					24.9	37.8
3					<b>Car</b>	26.2					26.2	35.3
4					<b>Car</b>	27.1	Metro	6.5	Walk	0.2	27.1	42.3
5			Bicycle	3.7	<b>Train</b>	19.8	Bicycle	3.3			26.8	58.8
6			Bicycle	3.5	<b>Train</b>	19.8	Bicycle	3.3			26.6	58.1
7			Bicycle	3.5	<b>Train</b>	19.8	Bicycle	3.3			26.6	58.0
8			Bicycle	3.5	<b>Train</b>	19.8	Bicycle	3.3			26.7	58.3
9			Bicycle	3.5	<b>Train</b>	19.8	Bicycle	3.3			26.7	58.2
10			Bicycle	3.5	<b>Train</b>	19.8	Bicycle	3.3			26.7	58.3
11			Bicycle	3.5	<b>Train</b>	19.8	Bicycle	3.3			26.7	58.2
12			Bicycle	0.7	<b>Train</b>	22.2	Bicycle	3.3			26.3	58.6
13			Bicycle	0.7	<b>Train</b>	22.2	Bicycle	3.3			26.3	58.7
14			Bicycle	0.7	<b>Train</b>	22.2	Tram	3.1	Walk	0.2	26.3	61.1
15			Bicycle	3.7	<b>Train</b>	19.8	Tram	3.1	Walk	0.2	26.8	61.3
16			Bicycle	3.5	<b>Train</b>	19.8	Tram	3.1	Walk	0.2	26.7	60.6
17			Bicycle	3.5	<b>Train</b>	18.1	Metro	3.3	Walk	0.2	25.3	62.0
18			Bicycle	5.0	<b>Train</b>	16.1	Metro	3.3	Walk	0.2	24.7	66.4
19			Walk	0.7	<b>Train</b>	20.6	Metro	3.3	Walk	0.2	24.9	63.6
20			Walk	0.7	<b>Train</b>	22.2	Tram	3.1	Walk	3.1	26.3	66.2
21	Walk	0.7	Bus	2.9	<b>Train</b>	19.8	Tram	3.1	Walk	0.2	26.7	59.4
22	Walk	0.7	Bus	2.9	<b>Train</b>	18.1	Metro	3.3	Walk	0.2	25.3	60.8



# Umlegungsergebnis für ÖV-captives

Dordrecht CS- R-Alexander







# Fazit intermodaler Modellansatz (1)

- **Intermodale Wege sind ein kleiner Markt, dennoch sehr wichtig für die Planung.**

**Komplexe Entscheidungssituation bei intermodalen Wegen verlangt angemessenen Ansatz für die Verkehrsmittelwahl.**

**Routenwahl in Supernetzen ermöglicht simultane Lösung verschiedener Entscheidungsebenen.**

**Der Supernetzansatz erweist sich als praktisch ausführbar und als wissenschaftlicher Fortschritt.**

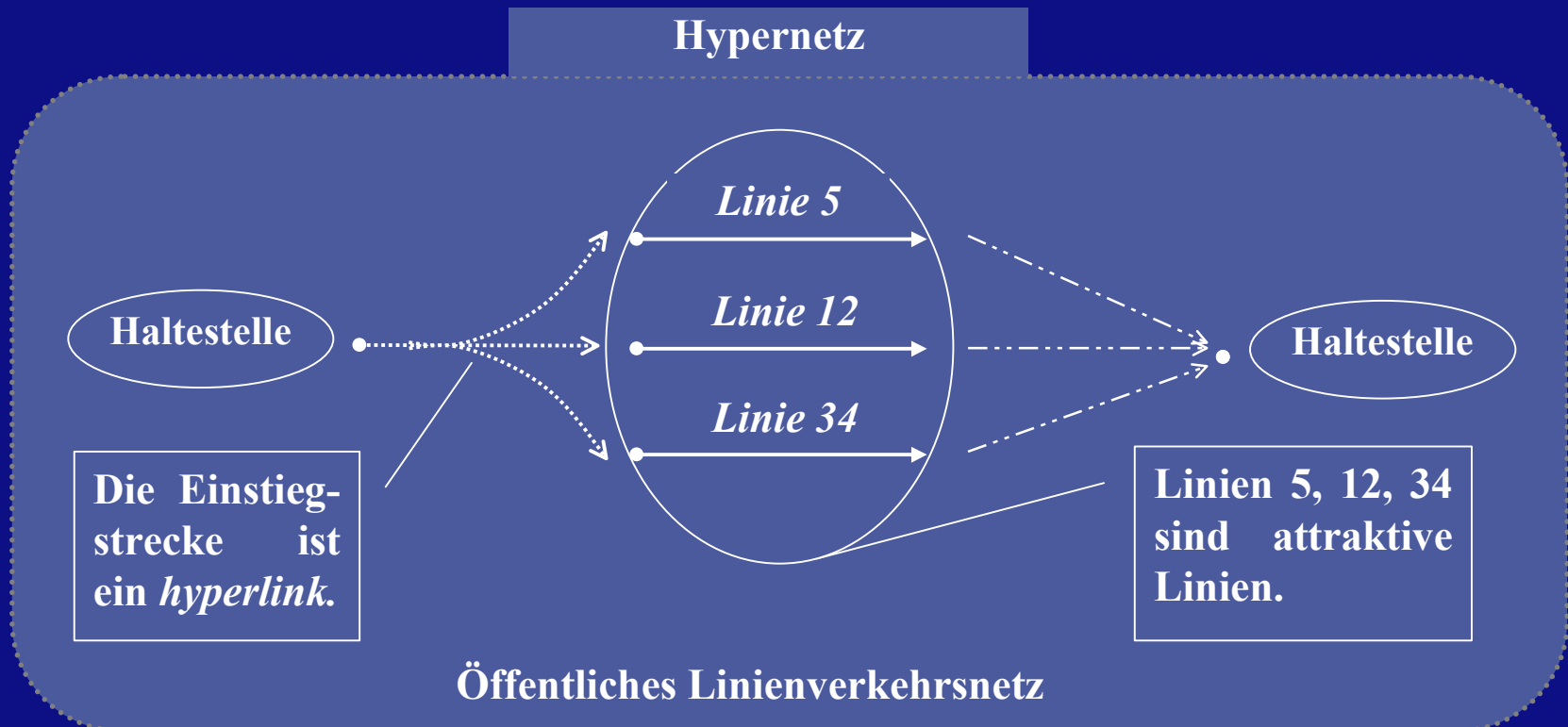


# Fazit Supernetzansatz der Verkehrsmittelanalyse (2).

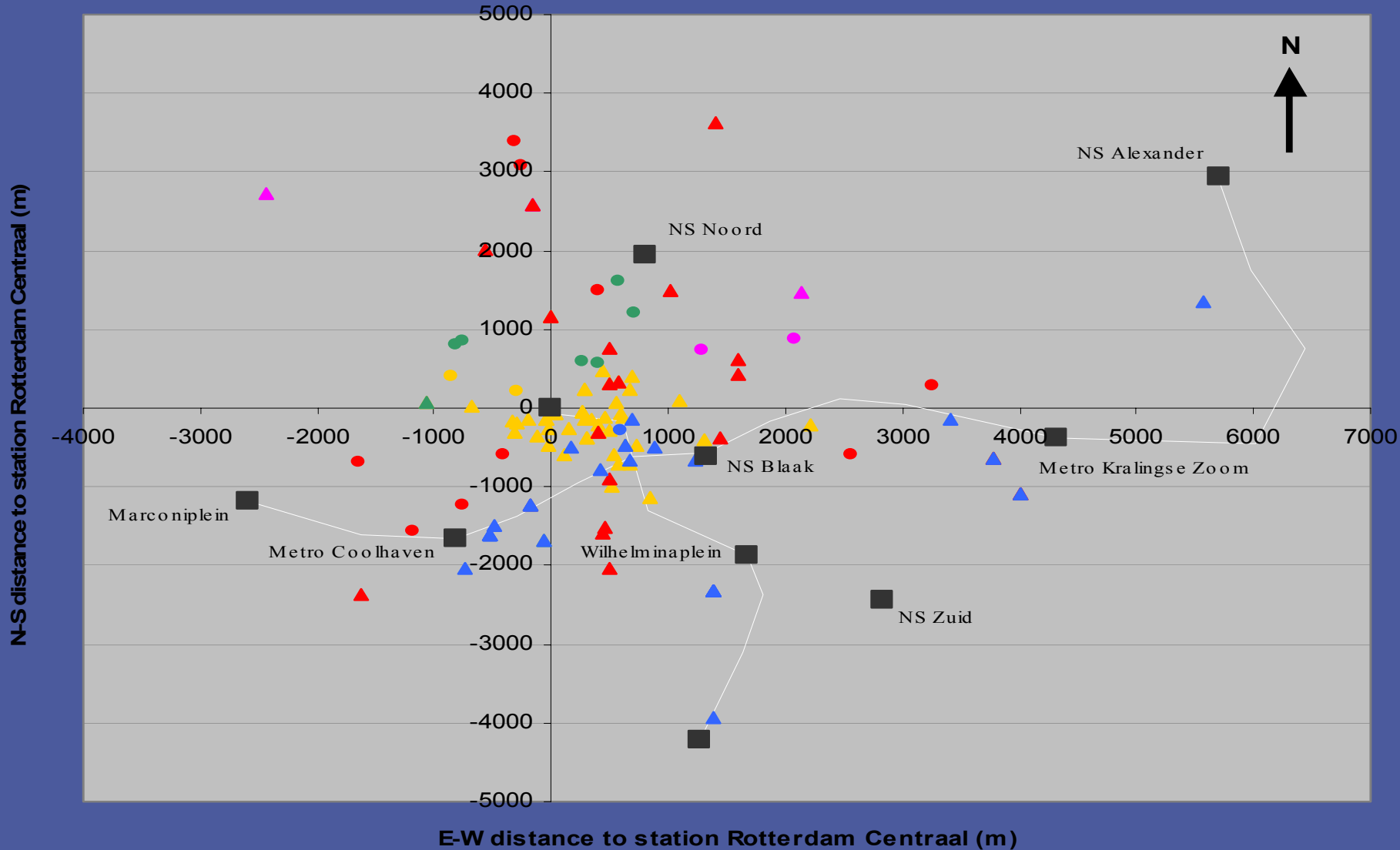
- **Automatische Konstruktion von Supernetzen aus unimodalen Netzen ist ausführbar,**
- **Netzmodellgrösse ist kein Arbeitshindernis.**
- **Trennung von Routenerzeugung und Routenwahl ist vorteilhaft und ausführbar.**
- **Routenerzeugungsalgorithmen mit gruppenspezifischen Funktionen liefern realistische mm/im Alternativenmengen.**
- **PCL Modell liefert plausible Resultate für die multimodale Routenwahl.**

# Hypernetz oder Supernetz?

Ein *Hypernetzwerk* ist eine Modellnetzform, welche mittels sogenannter *Hyperlinks* mehrere Knoten gleichzeitig verbindet.



# Trip ends using railway station Rotterdam CS



walk - home end  
bus - home end  
metro - home end

walk - act end  
bus - act end  
metro - act end

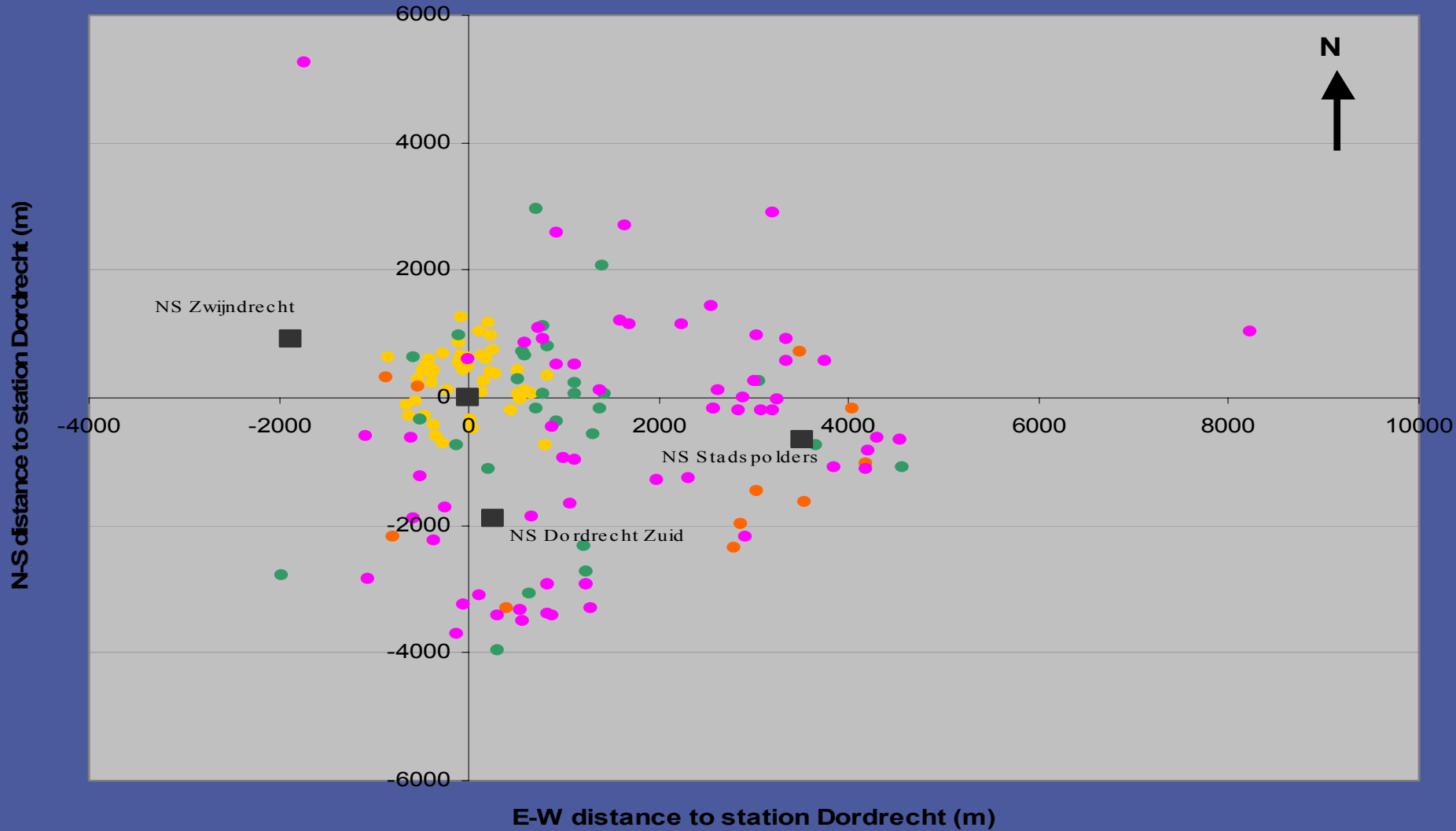
bike - home end  
tram - home end  
NS/metro stations

bike - act end  
tram - act end

# Trip ends using railway station Blaak



# Trip ends using railway station Dordrecht CS



● walk

● bike

● car

● bus

■ NS stations