

Konferenz Verkehrsökonomie und –politik
Berlin, 30. Juni 2017

Eignung deterministischer Verkehrsmittelwahlmodelle für die kommunale Verkehrsplanung

M. Sc. Fabian Stoll

Dipl.-Ing. Bastian Kogel



Aufgaben kommunaler Verkehrsplanung

Strategische Langfristplanung

Planungsinstrumente



Verkehrsentwicklungsplan

Nahverkehrsplan

Klimaschutzteilkonzept

Kurzfristige Planungserfordernisse

Steuerung des Kfz-Verkehrs



Verkehrsberuhigung

Verkehrslenkung

Parkraumbewirtschaftung

Stärkung des ÖPNVs



Beschleunigung

Erschließungsqualität

Förderung des Radverkehrs



Radverkehrsführung

Rahmenbedingungen kommunaler Verkehrsplanung

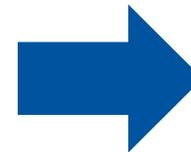
Strategische Langfristplanung

- Lange Geltungsdauer
- Meist gesetzlich verpflichtend
- Planbare Ressourcen
- Anwendung etablierter Methoden und Modelle

Kurzfristige Planungserfordernisse

- Bürger- und Politikgetrieben
- Lösung dringlicher Probleme
- Bedingt planbare Ressourcen
- Modellanwendung schwierig

- ✓ Raumstrukturanalyse (IST/PLAN)
- ✓ Analyse des Verkehrsangebots
- ✓ Analyse der Verkehrsbeziehungen
- ✓ Haushaltsbefragung
- ✓ Vier-Stufen-Algorithmus
- ✓ Abgeleitetes Handlungskonzept



Zeit- und kostenintensiv

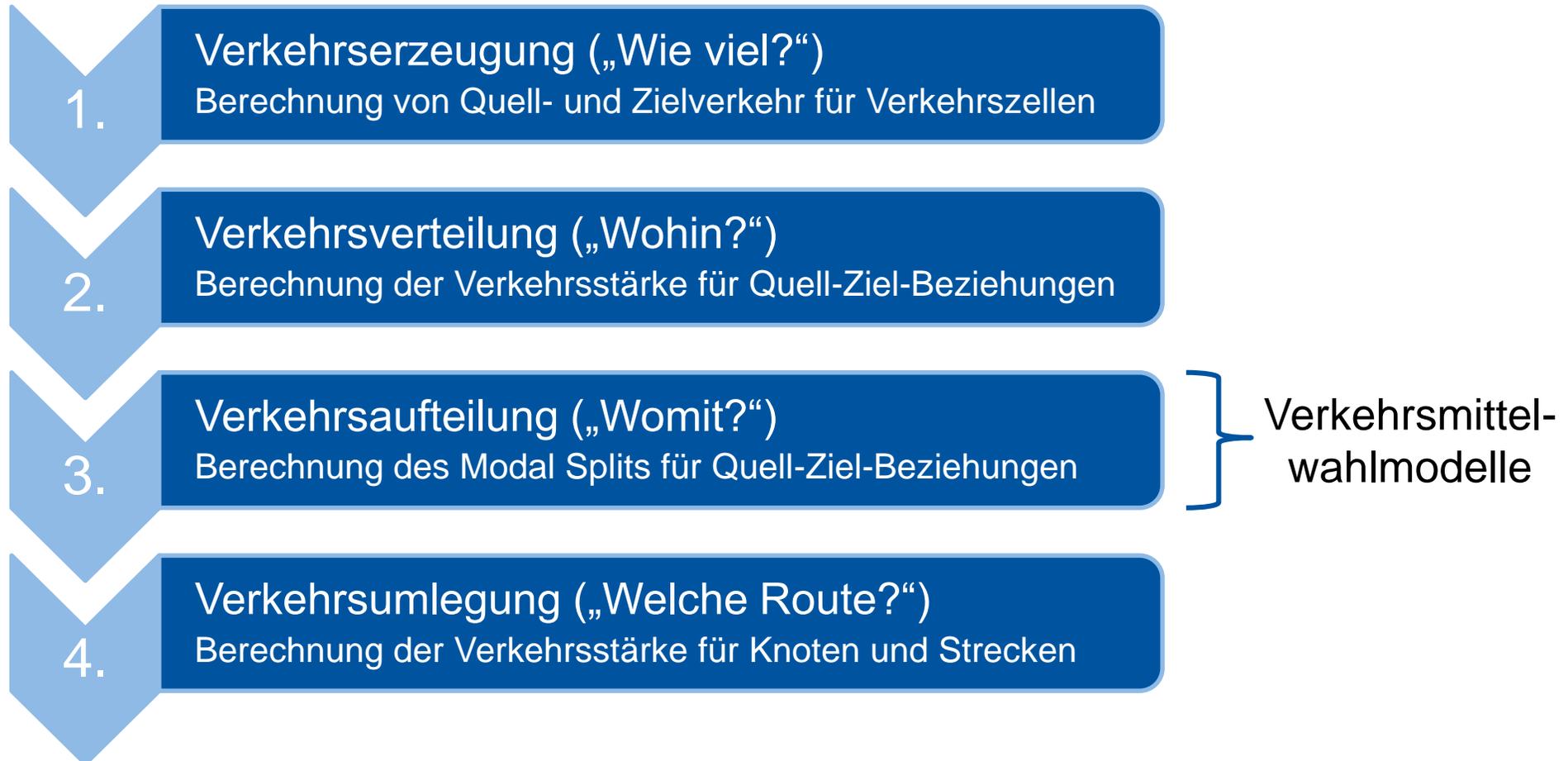
Bedingt maßnahmenreagibel

Globale Kalibrierung

Software gestützt

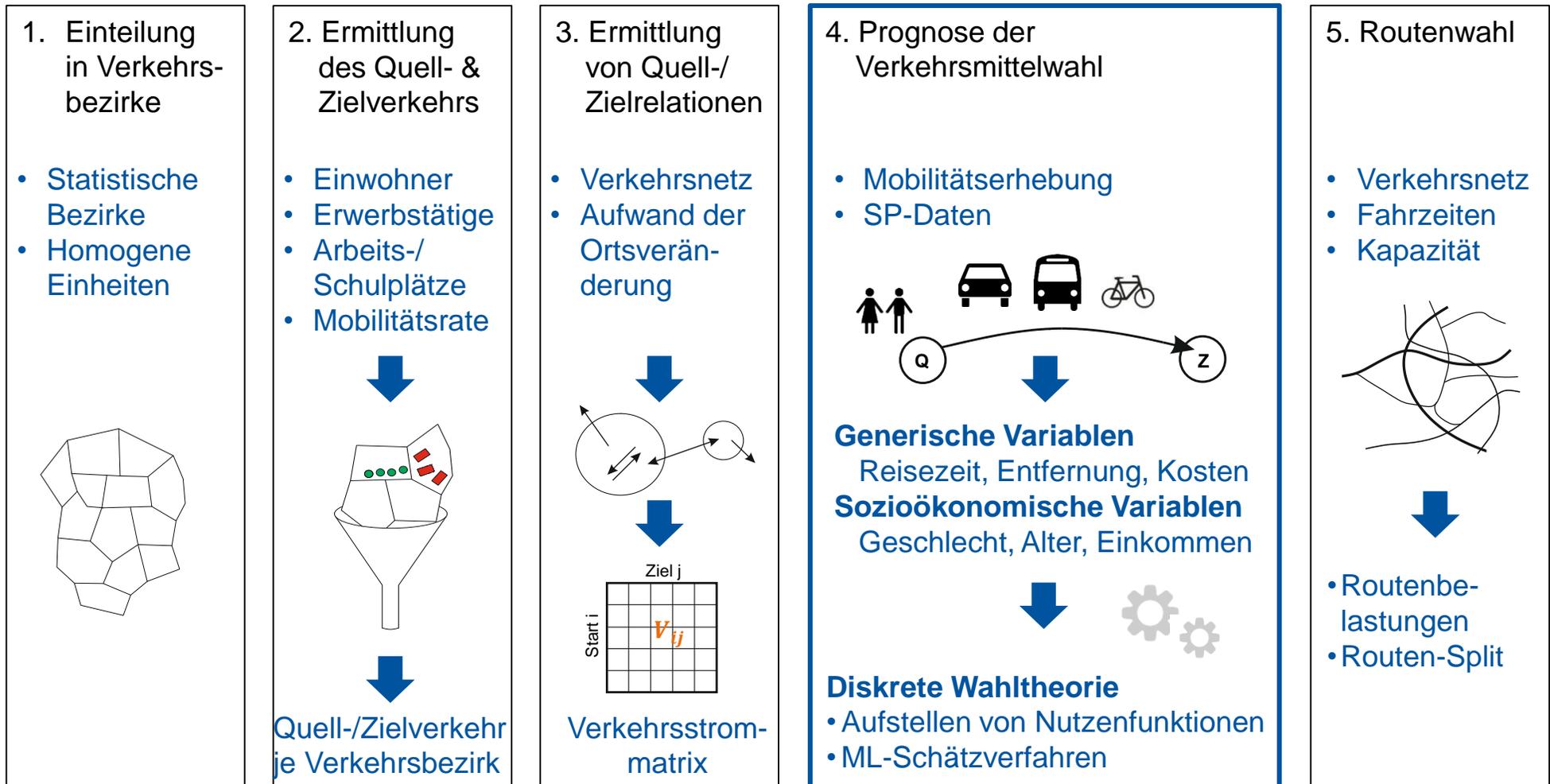
Anwendung von Verkehrsmittelwahlmodellen

Traditioneller „Vier-Stufen-Algorithmus“ der Verkehrsplanung



Anwendung von Verkehrsmittelwahlmodellen

Klassischer Verfahrensablauf zur Anwendung eines Verkehrsmodells



Anwendung stochastischer Ansätze

Logistische Regression (LOGIT)

- Variante der Regressionsanalyse: Strukturen-prüfendes Verfahren
- Abbildung diskreter Wahlentscheidungen im Verkehrswesen
 - Welches Verkehrsmittel wird ein Verkehrsteilnehmer wählen?
 - Multinomiale logistische Regression: Abbildung mehrerer Auswahlmöglichkeiten
 - Schätzung von Regressionskoeffizienten (Prädiktoren)

$$U_{VM} = \underbrace{\sum_i (\beta_i \cdot x_{VM,i})}_{\text{deterministischer Nutzen}} + \underbrace{\alpha_{VM}}_{\text{Störterm}}$$

U_{VM} Gesamtnutzen eines Verkehrsmittels

β_i attributabhängiger Schätzparameter

$x_{VM,i}$ betrachtetes Attribut für ein Verkehrsmittel

α_{VM} Alternativen-spezifische Konstante

$$P_{VM} = \frac{e^{U_{VM}}}{\sum_i e^{U_{VM,i}}}$$

P_{VM} Auswahlwahrscheinlichkeit je Verkehrsmittel

i Laufindex über alle Verkehrsmittel

Anwendung stochastischer Ansätze

Auswertung einer Mobilitätserhebung (B-Stadt)

- Randbedingungen
 - Kleine Großstadt (ca. 100 Tsd. Einwohner)
 - Stichprobenerhebung für mind. 2 % der Einwohner (2.300 Befragte)
 - Gleichmäßige Stichprobenabdeckung über 17 Bezirke
 - Erhebung nach MiD/KONTIV-Design per Internet, Telefon und postalisch
- Deskriptive Auswertung durch Endbericht (Beispiele)

Anz. Wege/Pers. und Tag



MiD 2008

Anz. Wege/Tag mit Führerschein



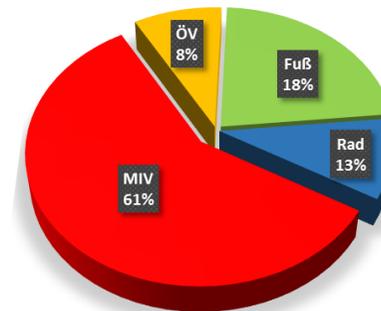
MiD 2008

Anz. Wege/Tag ohne Führerschein

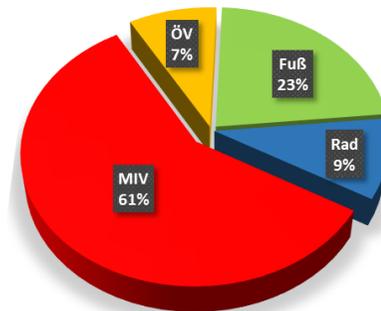


MiD 2008

Modal Split B-Stadt

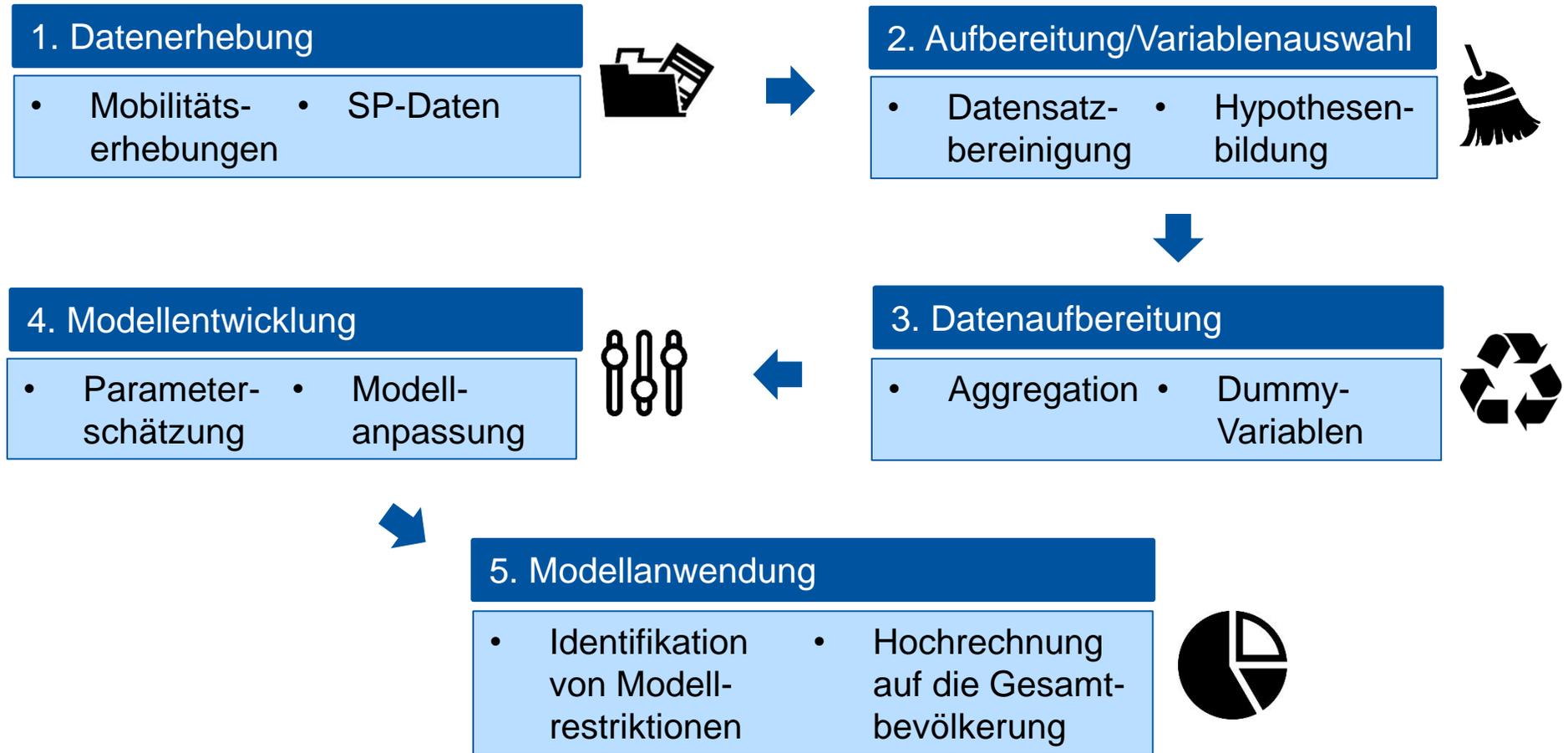


Modal Split MiD 2008



Anwendung stochastischer Ansätze

Entwicklung eines statistisch validen LOGIT-Modells



Anwendung stochastischer Ansätze

Methodische Grenzen und Modelleinschränkungen

Modellentwicklung

- Parameterschätzung je Fahrtzweck (Arbeit, Einkaufen etc.) führt zu geringen Fallzahlen
- Einfluss der Variablen „Wetter“, „Verfügbarkeit Rad“, „Kosten“ und „Alter < 18“ nicht signifikant
- Variable Reisezeit weist zu hohe Schwankungsbereiche auf

Modellparameter (Bsp.)

Verkehrsmittel	Parameter	β	std. error	p-Wert
Fuß	ASC	8.733	0.638	0.000
	Entfernung	-1.239	0.057	0.000
	Besitz Führers.	-4.117	0.367	0.000
	ÖV-Abonnem.	0.467	0.179	0.009
	Verfügbar. Pkw	-3.756	0.522	0.000
	Alter > 64	0.570	0.127	0.000
Rad	ASC	6.951	0.630	0.000
	Entfernung	-0.143	0.022	0.000
	Besitz Führers.	-3.943	0.367	0.000
	ÖV-Abonnem.	0.532	0.164	0.001
	Verfügbar. Pkw	-3.813	0.515	0.000
	Alter > 64	-0.147	0.138	0.286

Anwendung stochastischer Ansätze

Methodische Grenzen und Modelleinschränkungen

Verarbeitete Fälle

Variable	Ausprägung	Anzahl Wege	%
Verkehrsmittel	Fuß	875	22.2
	Rad	740	18.8
	MIV (Fahrer)	1.640	41.7
	MIV (Mitfahrer)	467	11.9
	ÖPNV	215	5.5
Führerscheinbesitz (BeF)	ja	3.154	80.1
	nein	783	19.1
Alter > 64 (AlterA)	ja	678	17.2
	nein	3.259	82.8
Pkw-Verfügbarkeit (VeP)	ja	3.635	92.3
	nein	302	7.7
ÖV-Abonnement (BeT)	ja	558	14.2
	nein	3.379	85.9
		3.937	

Prognostizierte Fälle

Variable	Ausprägung	Anzahl Wege	Übereinstimmung [%]
Verkehrsmittel	Fuß	557	63,7
	Rad	203	27.4
	MIV (Fahrer)	1.483	90.4
	MIV (Mitfahrer)	107	22.9
	ÖPNV	101	47.0
		2.451	$\bar{x}_{arithm} = 72.3$

Ein LOGIT-Modell für alle Variablenkombinationen erzeugt große Ungenauigkeiten bei der Prognose der Verkehrsmittelwahl Rad, MIV (Mitfahrer) und ÖPNV

Anwendung stochastischer Ansätze

Methodische Grenzen und Modelleinschränkungen

BeT	VeP	AlterA	BeF	Fälle	%	VK	
1	1	1	1	11	0.3		$4^2 = 16$ Variablenkombinationen 4 Variablenkombinationen (Gruppen) bilden 80,7 % der Wege im Binnenverkehr von B-Stadt statistisch signifikant ab. 76 % der Bevölkerung in B-Stadt lassen sich in die 4 Gruppen einordnen.
			0	21	0.5		
		0	1	221	5.6	1*	
			0	196	4.9	2*	
	0	1	1	4	0.2		
			0	7	0.2		
		0	1	38	1.0		
			0	60	1.5		
0	1	1	1	523	13.3	3*	
			0	67	1.7		
		0	1	2241	56.9	4*	
			0	355	9.0		
	0	1	1	35	0.9		
			0	10	0.3		
		0	1	81	2.1		
			0	67	1.7		
				3.937	100.0		

	Kombination 4(*)		Kombination 3(*)	
Verkehrsmittel	MS beobachtet [%]	MS prognostiziert [%]	MS beobachtet [%]	MS prognostiziert [%]
Fuß	17.1	16.6	23.9	23.5
Rad	17.1	16.2	13.6	13.9
MIV (Fahrer)	57.7	57.6	45.9	45.1
MIV (Mitfahrer)	6.7	7.2	14.7	14.8
ÖPNV	1.3	2.3	1.9	2.7

* in Abhängigkeit der Variable „Entfernung“

* = $\rho < 0,05$ 1 = trifft zu

Anwendung stochastischer Ansätze

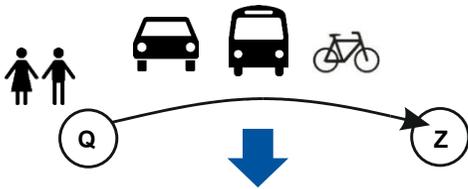
Methodische Grenzen und Modelleinschränkungen

- Etwa 20 % der erfassten Wege sind nicht statistisch valide zu prognostizieren
 - zu geringe Fallzahlen in Merkmalsgruppen (24 % der Bevölkerung unberücksichtigt)
 - Ausprägung abhängiger Variablen zu selten beobachtet (ÖV nur 215/3.937 Wegen)
 - keine valide Schätzung einiger erklärender Variablen (z.B. Wetter, Kosten etc.)
 - Multikollinearität zwischen Variablen (z.B. Alter < 18 und Verfügbarkeit Pkw)
- Einschränkungen für die LOGIT-Modellanwendung
 - etwa 20 % der Nutzerentscheidungen werden im Modell vernachlässigt
 - keine Aussagen möglich zu
 - fahrtzweckspezifischem Modal-Split (z.B. Arbeit, Einkaufen)
 - Einfluss von Wegekosten auf Entscheidungen
 - Einfluss von (Zugangs-/Abgangs-/Warte-/Beförderungs-) Zeiten und Komfort im ÖV

Anwendung deterministischer Ansätze

Stochastische Prognose der Verkehrsmittelwahl

- Mobilitätserhebung
- SP-Daten



Gen. Variablen

Reisezeit, Entfernung, Kosten

Sozioökonomische Variablen

Geschlecht, Alter, Einkommen



Diskrete Wahltheorie

- Aufstellen von Nutzenfunktionen
- ML-Schätzverfahren

Charakteristik deterministischer Modelle

Deterministische Modelle basieren auf bekannten oder hypothetischen Gesetzen. Dieselben Eingabewerte führen daher immer zu denselben Ergebnissen.

Vorteile

- geringere Datenanforderungen
 - Verzicht auf kleinräumige Verkehrserhebungen
 - Verkehrsangebot leicht quantifizierbar
- einfache Modellanwendung
 - Abbildung subjektiver Größen durch allgemeingültige Bewertungsfaktoren/-funktionen
 - erhöhte Transparenz infolge definierter Kalibrierungsparameter
- adäquate Modellvalidierung
 - Vorher-/Nachher-Vergleich der Verkehrsmittelwahl

Anwendung deterministischer Ansätze

Bestimmung der ÖV-Attraktivität über Reisezeitäquivalente

Abschätzung der Fahrgastnachfrage im BMVI-Planungsleitfaden
„Mobilitäts- und Angebotsstrategien in ländlichen Räumen“

$$R_{\text{ö}v,a \rightarrow B,ak,fzw} = t_{\text{ö}v,a \rightarrow B} + \underbrace{0,5 \cdot f_{\text{ö}v,a \rightarrow B}^{K_{f,fzw}}}_{\text{Takt}} + \underbrace{u_{\text{ö}v,a \rightarrow B} \cdot K_{u,fzw}}_{\text{Umstiege}} + \underbrace{P_{\text{ö}v,a \rightarrow B} \cdot K_{p,fzw}}_{\text{Kosten}}$$

Reisezeitäquivalente Bewertung

Takt

Umstiege

Kosten

$$t_{\text{ö}v} = t_{\text{Zugang}} + t_{\text{Wartezeit}} + t_{\text{Umsteigezeit}} + t_{\text{Fahrzeit}} + t_{\text{Abgangszeit}}$$



[BMVI 2016]

$R_{\text{ö}v,a \rightarrow B,ak,fzw}$:

$t_{\text{ö}v,a \rightarrow B}$:

$f_{\text{ö}v,a \rightarrow B}$:

$K_{f,fzw}$:

$u_{\text{ö}v,a \rightarrow B}$:

$K_{u,fzw}$:

$P_{\text{ö}v,a \rightarrow B}$:

$K_{p,fzw}$:

ÖV-Reisezeitäquivalente auf der Relation a nach B
in der Altersklasse ak mit dem Fahrtzweck fzw

ÖV-Reisezeit auf der Relation a nach B

durchschnittliche Fahrtfolgezeit in Minuten

fahrtzweckabhängige Bedienungshäufigkeitssensibilität

Umsteigehäufigkeit auf der Relation a nach B

fahrtzweckabhängiger Umsteigesensibilitätsfaktor

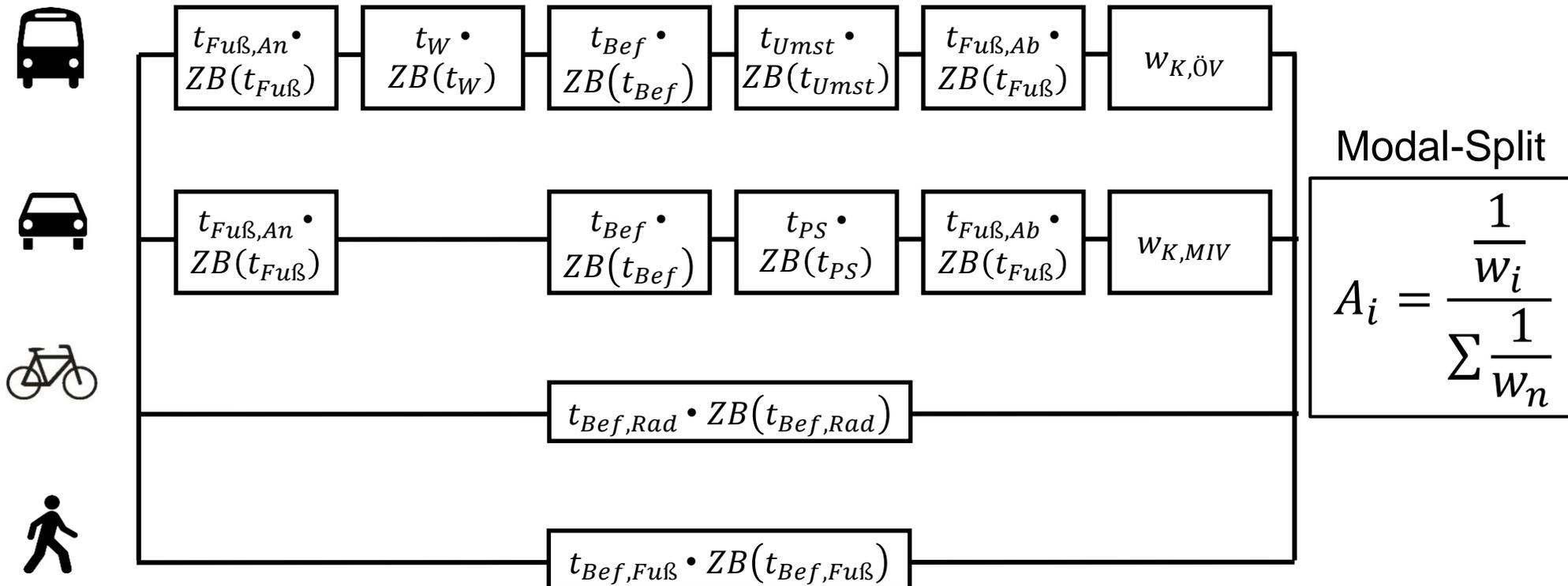
ÖV-Fahrpreis auf der Relation a nach B

fahrtzweckabhängiger Preissensibilitätsfaktor

Anwendung deterministischer Ansätze

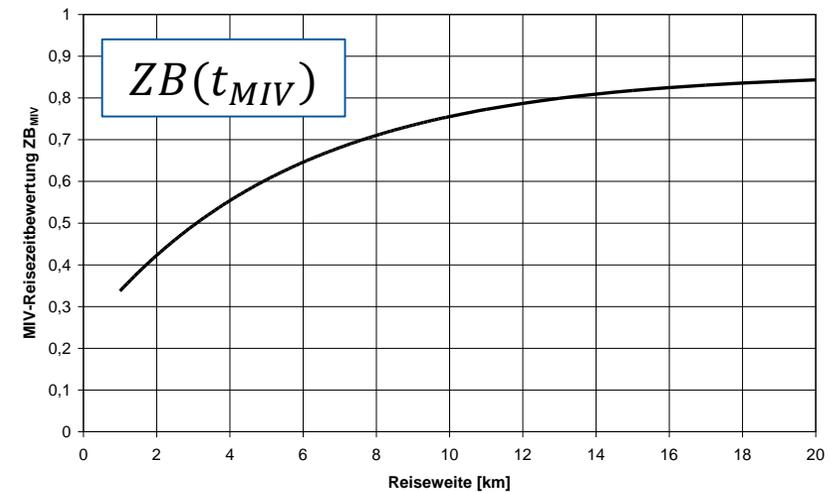
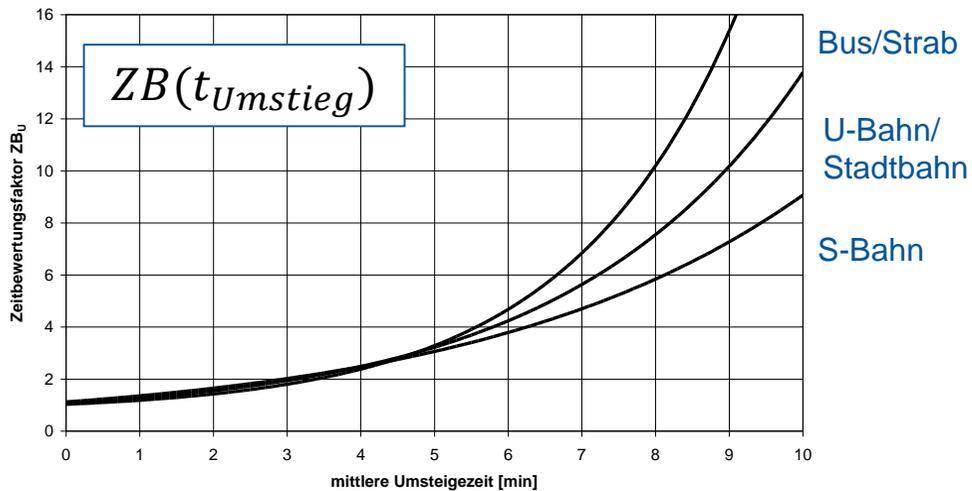
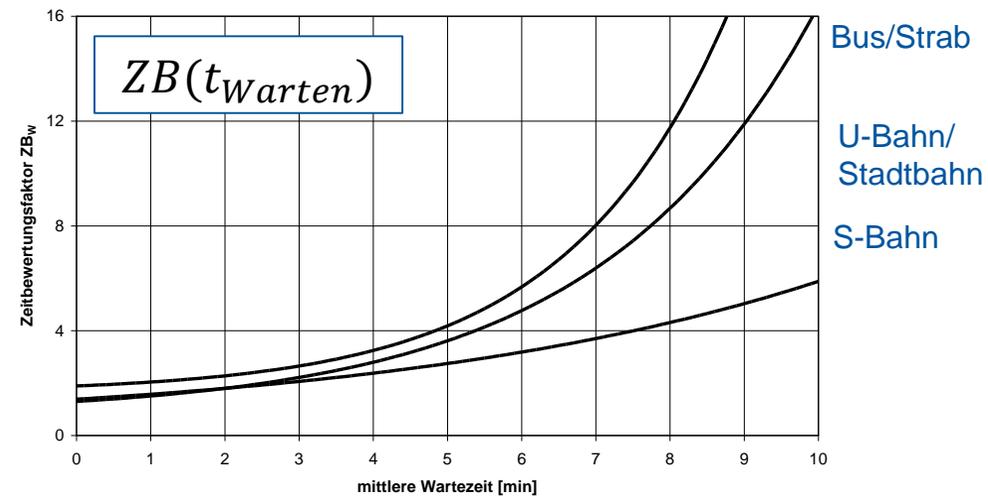
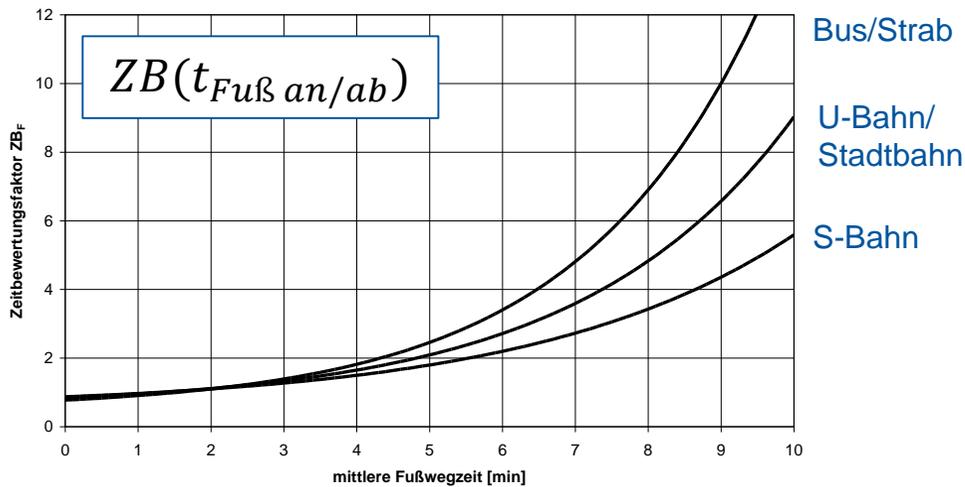
Verkehrsmittelwahlmodell Nahverkehr

Zerlegung der gesamten QZ-Reisekette in Einzelwiderstände mit Zeitbewertungsfaktoren



Anwendung deterministischer Ansätze

Verkehrsmittelwahlmodell Nahverkehr



Anwendung deterministischer Ansätze

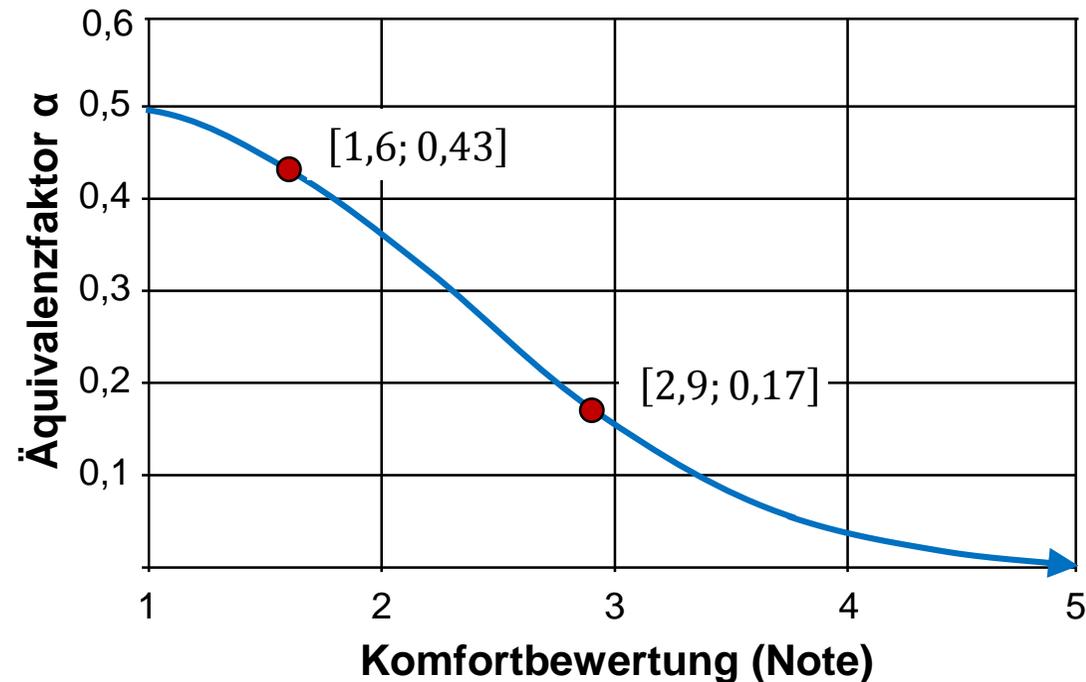
Verkehrsmittelwahlmodell Nahverkehr

Eingang von Kostenparametern

- Betrachtung aller entstehenden Kosten für Verkehrsmittelnutzung
- Bsp. Eingang von Parkgebühren

$$w_{K, \text{Parken}} = \frac{K_{\text{Parken}} \cdot t_{\text{Parken}}}{\alpha_{\text{Parken}} \cdot E \cdot B}$$

- Steuerung der Wertigkeit von Kostenwiderstände über Kostenäquivalenzfaktoren (α)
- Betrachtung des Komforts im ÖPNV über Kostenäquivalenz



Anwendung deterministischer Ansätze

Verkehrsmittelwahlmodell Nahverkehr: Weiterentwicklung

Car-Sharing



E-Bike



Mitfahr-
gelegen-
heit



Bewertung Radverkehrsführung



[ISB RWTH Aachen]

Neue Informations- und Kommunikationsmedien



[www.cocodibu.de]

Anwendung deterministischer Ansätze

Verkehrsmittelwahlmodell Nahverkehr

Prototypische Softwarelösung

fMain

Monatliches Einkommen [€/min]

ÖPNV

Fußweg An [min]

Taktzeit [min]

Beförderungszeit [min]

Umsteigezeit [min]

Fußweg Ab [min]

Kosten Ticket [€]

Alpha0 [-]

Globalnote ÖV

MIV

Fußweg An [min] Länge Fußweg [km]

Beförderungszeit [min] Länge Radweg [km]

Parkplatzsuchzeit [min] Topologie Radweg

Fußweg Ab [min]

Betriebskosten [€/km]

Alpha Betrieb [-]

Benzinkosten [€/km] Vor Berechnung Alpha-Iteration durchführen

Alpha Benzin [-]

Parkkosten [€]

Alpha Parken [-]

Länge Strecke [km]

PKW Besetzungsgrad [P/Pkw]

Globalnote MIV

Verkehrssystem ÖPNV

S-Bahn

U-Bahn/Stadtbahn

Bus/Straßenbahn

Variante anlegen und Modalsplit zeigen

Funktionen anzeigen

Modal-Split Viewer

TestVariante

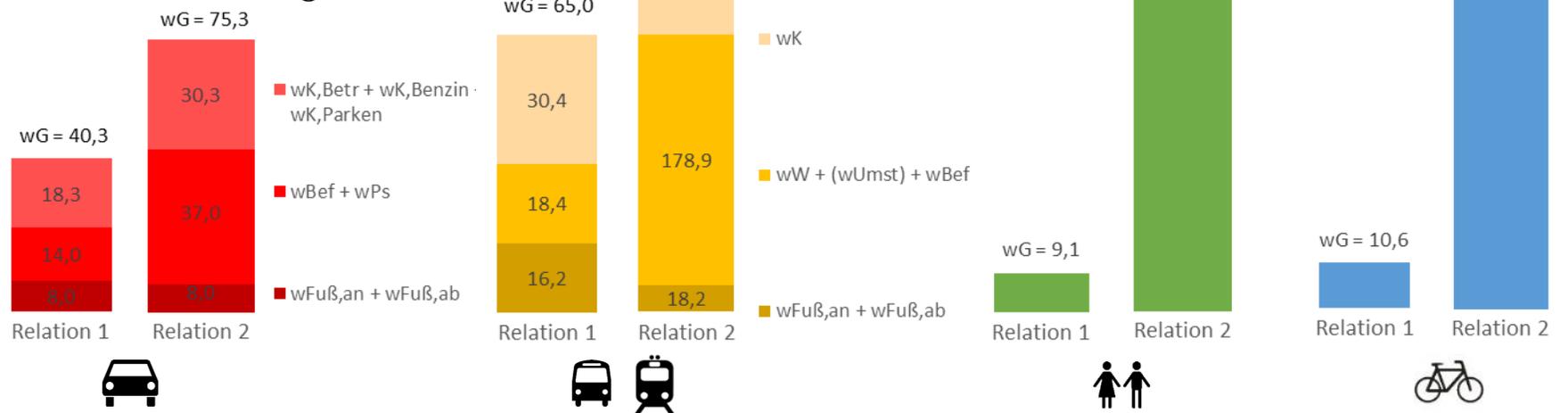
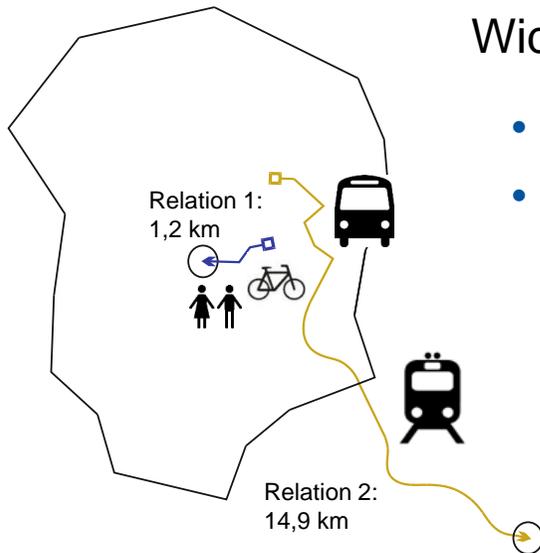
Widerstand	Eingangswert	ggf. Bewertung	Ergebnis
ÖPNV W_Fuß_ab	t_Fuß_ab = 3	ZB_Fuß_ab = 1.33572	W_Fuß_ab = 4.00717
ÖPNV W_Fuß_an	t_Fuß_an = 1	ZB_Fuß_an = 0.955112	W_Fuß_an = 0.955112
ÖPNV W_W	t_W = 5.52983	ZB_W = 4.17457	W_W = 23.0846
ÖPNV W_Bef	t_Bef = 10	ZB_Bef = 1	W_Bef = 10
ÖPNV W_Umst	t_Umst = 5	ZB_Umst = 3.22164	W_Umst = 16.1082
ÖPNV W_Takt	t_Takt = 15	---	t_W = 5.52983
ÖPNV W_K	E = 0.8; K = 5	alpha_ÖV = 0.17	W_K = 36.7647

Anwendung deterministischer Ansätze

Verkehrsmittelwahlmodell Nahverkehr

Widerstandskette für zwei Beispielrelationen

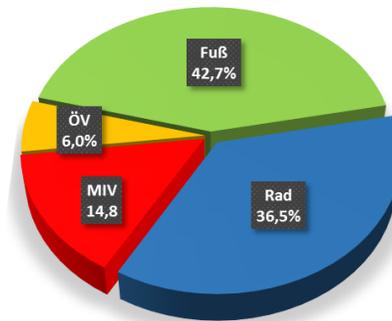
- R1: innerstädtisch (1,2 km)
- R2: Quell-/Zielverkehr (14,9 km)



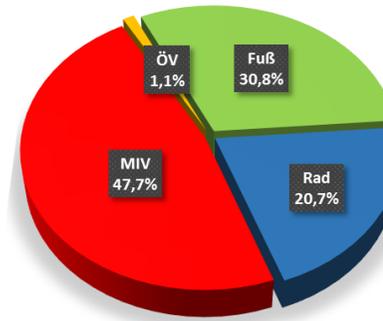
Anwendung deterministischer Ansätze

Verkehrsmittelwahlmodell Nahverkehr

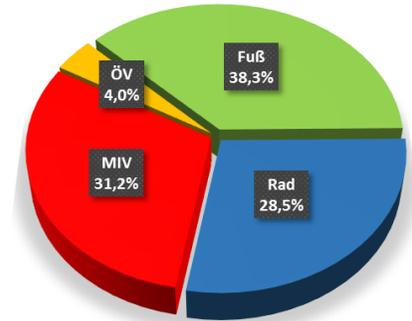
VIA-Widerstandsmodell Nahverkehr



Relationsfeine Haushaltserhebung



LOGIT-Modell für Gesamtbevölkerung



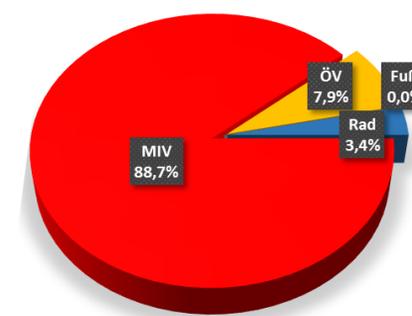
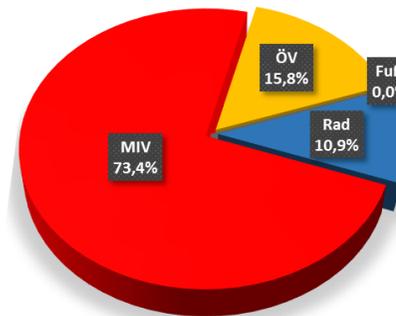
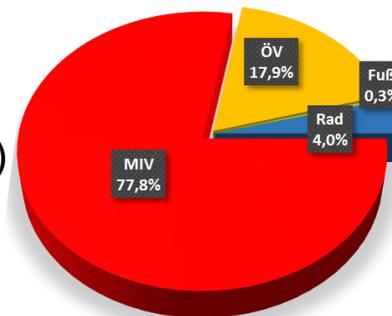
N = 93 Wege

Relation 1

- innerstädtisch (1,2 km)
- 10-Minuten-Takt (Bus)
- attraktive Fuß-/Radwege

Relation 2

- Quell-/Zielverkehr (14,9 km)
- 20-Minuten-Takt (Bus/S-Bahn)
- unattraktive Radwege



N = 36 Wege

Deterministische vs. stochastische Ansätze

Erfüllung klassischer Modellanforderungen

Anforderungen	Deterministische Ansätze	Stochastische Ansätze
Modell-adäquatheit	<ul style="list-style-type: none"> Variablengewichtung mithilfe von Bewertungsfunktionen/-faktoren Validierung durch Beobachtung der Nutzerreagibilität nach Veränderungen 	<ul style="list-style-type: none"> Variablengewichtung nach Parameterschätzung/Regression Validierung durch statistische Erfassung des Nutzerverhaltens
Operationalität	<ul style="list-style-type: none"> Einfache Datenbeschaffung Widerstandsfunktionen sind allgemeingültig anwendbar 	<ul style="list-style-type: none"> Hoher Aufwand zur Erfassung des Nutzerverhaltens (Stichprobe) Aufwändige Kalibrierung (Regression)
Transparenz	<ul style="list-style-type: none"> Transparente Gewichtungsfunktionen/-faktoren 	<ul style="list-style-type: none"> Iterative Ermittlung von Skalierungsparametern schwierig nachvollziehbar
Logische Konsistenz	<ul style="list-style-type: none"> Anpassung an lokale Mobilitätsmuster über Deterministik teilweise schwierig Zyklische Anpassung von Gewichtungsfunktionen notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> Beachtung statistischer Gütekriterien führt oft zu Modelleinschränkungen Feinkalibrierung über Rückkopplungen mit Verteilungs-/Routenwahlmodellen

Deterministische vs. stochastische Ansätze

Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

Planungsinstrumente (Bsp.)



Verkehrsentwicklungsplan

Nahverkehrsplan

Klimaschutzteilkonzept

Planungserfordernisse (Bsp.)



Verkehrsberuhigung



ÖV-Erschließungsqualität



Radverkehrsführung

Langfristige Planungen rechtfertigen erhöhten Aufwand stochastischer Verkehrsmittelwahlmodelle

- adäquate Prognose genereller Entwicklungen (Bevölkerungsstruktur, Mobilität, Sozioökonomie...)
- Stichprobeninhärente prognostische Grenzen fallen weniger ins Gewicht

Zur Wirkungsabschätzung **kurzfristiger Planungserfordernisse** eignen sich besonders deterministische Modelle

- niedriger Daten- und Kostenaufwand
- Anwenderfreundliche Modellumgebung
- gute Nachvollziehbarkeit
- einfache Interpretierbarkeit unter Beachtung lokaler Gegebenheiten