



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Erstellung von Grundlagen für die Beeinflussung von Tagesganglinien

**Création de bases permettant d'influencer les
distributions horaires du trafic journalier**

**Analysis of factors influencing the temporal
distribution of travel demand**

TransSol GmbH
Philipp Fröhlich

TransOptima GmbH
Robert Simon
Milenko Vrtic
Claude Weis

VMZ GmbH
Siegurd Müller

**Forschungsprojekt VPT_20_01C_01 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen ASTRA
Oktober 2025 | 1804**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Erstellung von Grundlagen für die Beeinflussung von Tagesganglinien

**Création de bases permettant d'influencer les
distributions horaires du trafic journalier**

**Analysis of factors influencing the temporal
distribution of travel demand**

TransSol GmbH
Philipp Fröhlich

TransOptima GmbH
Robert Simon
Milenko Vrtic
Claude Weis

VMZ GmbH
Siegurd Müller

**Forschungsprojekt VPT_20_01C_01 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen ASTRA
Oktober 2025 | 1804**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Philipp Fröhlich

Mitglieder

Robert Simon

Milenko Vrtic

Claude Weis

Siegurd Müller

Begleitkommission

Präsident

Stefan Dasen

Mitglieder

Andreas Justen (Präsident bis Dezember 2024)

Christoph Baur

Joschka Bischoff

Maik Hömke

Danièle Müller

Michael Redle

Roman Rosenfellner

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
<https://www.mobilityplattform.ch/>
heruntergeladen werden.

Oktober 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung.....	11
Résumé	16
Summary	21
1 Einleitung.....	25
1.1 Problembeschreibung.....	25
1.2 Internationaler Stand der Forschung und Forschungsbedarf.....	26
1.3 Forschungsbedarf.....	27
2 Aufbau der dynamischen Verkehrsmodelle	29
2.1 Erstellung viertelstundefines GVM Luzern	29
2.1.1 Zeitscheibenfeine Matrizen	29
2.1.2 Anpassungen Netze	31
2.1.3 Zähldaten.....	31
2.2 MIV-Umlegungsverfahren.....	32
2.3 ÖV-Verfahren	37
3 Wahl der Abfahrtszeit	39
3.1 Logit-Ansatz	39
3.2 Ablauf der Berechnung mit Korrekturmatrix.....	41
4 SP-Schätzung.....	45
4.1 ÖV-Nutzenfunktion	46
5 Analysemodell mit Wahl der Abfahrtszeit	49
5.1 MIV-Modell	49
5.1.1 MIV-Modell allgemein.....	49
5.1.1.1 PW-Verfahrensablauf.....	49
5.1.1.2 PW-Matrizen	50
5.1.1.3 PW-Nachfragesegmente und - Nachfragedaten	51
5.1.1.4 Allgemeine MIV- Verfahrenseinstellungen	52
5.1.1.5 Benutzerdefinierte Attribute (BDA)	52
5.1.1.6 MIV-Netzmodell.....	53
5.1.2 MIV-Nullfall	53
5.1.2.1 PW-Nachfragegrundlagen.....	53
5.1.2.2 Spezielle PW-Verfahrensschritte.....	53
5.1.3 MIV-Anwendungsfall	54

5.1.3.1	Befristete MIV-Attribute.....	54
5.1.3.2	Spezielle PW-Verfahrensschritte	54
5.2	ÖV-Modell.....	56
5.2.1	ÖV-Modell allgemein	56
5.2.1.1	ÖV-Verfahrensablauf.....	56
5.2.1.2	ÖV-Matrizen	56
5.2.1.3	ÖV-Nachfragesegmente und - Nachfragedaten.....	58
5.2.1.4	Allgemeine ÖV-Verfahrens- einstellungen.....	58
5.2.1.5	Benutzerdefinierte Attribute (BDA)	58
5.2.2	ÖV-Nullfall.....	59
5.2.2.1	ÖV-Nachfragegrundlagen	59
5.2.2.2	Spezielle ÖV-Verfahrensschritte.....	59
5.2.3	ÖV-Anwendungsfall	59
5.2.3.1	ÖV-Angebot	59
5.2.3.2	Spezielle ÖV-Verfahrensschritte.....	60
5.3	Nachfragemodell.....	62
6	Testszzenarien	67
6.1	Testszzenario A.....	67
6.1.1	Definition Testszzenario A.....	67
6.1.2	Gesamtnachfrageveränderung: Testszzenario A	68
6.1.3	Auswertung Testszzenario A: PW	69
6.1.4	Auswertung Testszzenario A: ÖV	71
6.1.5	Sensitivitätsrechnungen Testszzenario A: PW	73
6.1.6	Sensitivitätsrechnungen Testszzenario A: ÖV	74
6.2	Testszzenario B.....	75
6.2.1	Definition Testszzenario B.....	75
6.2.2	Gesamtnachfrageveränderung: Testszzenario B	76
6.2.3	Auswertung Testszzenario B: PW	77
6.2.4	Auswertung Testszzenario B: ÖV.....	79
6.2.5	Sensitivitätsrechnungen Testszzenario B: PW	81
6.2.6	Sensitivitätsrechnungen Testszzenario B: ÖV	82
6.3	Testszzenario C.....	84
6.3.1	Definition Testszzenario C.....	85
6.3.2	Auswertung Testszzenario C: PW	86
6.3.3	Auswertung Testszzenario C: ÖV.....	88
7	Fazit und Ausblick.....	91
	Literaturverzeichnis	93
	Projektabschluss	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung Nachfragereaktion bei Angebotsausbau ..	25
Abbildung 2: Ablaufschema zur Berechnung der viertelstundenfeinen Nachfragematrizen	31
Abbildung 3: Vereinfachte Funktionsverläufe zur zeitscheibenfeinen Aufteilung der Nachfragematrizen auf Umlegungsmatrizen in Abhängigkeit der Dauer des Weges auf der Relation	33
Abbildung 4: Ablaufschema des gesamten MIV-Modells mit Abfahrtszeitwahl (Schritte des neuen Ansatzes der dynamischen MIV-Umlegung in grau).....	34
Abbildung 5: Verfahrensablauf für dynamischen Ansatz auf Basis einzelner statischer IV-Umlegungen	36
Abbildung 6: Umlegungsanalyse der Zeitscheibe von 7.00 bis 7.15 für den PW-Verkehr	36
Abbildung 7: Ablaufschema des gesamten ÖV-Modells mit Abfahrtszeitwahl (Schritte der dynamischen ÖV-Umlegung in grau)	37
Abbildung 8: Formel des benutzerdefinierten Attributs «Auslastung_Sitz_PerStd (AP)»	38
Abbildung 9: Schema der «Schedule disutility» für die Nutzenfunktion nach Small (1982) in Ortuzar und Willumsen (2011).....	40
Abbildung 10: Schematischer Ablauf der Berechnung des Verschiebungsmechanismus	41
Abbildung 11: Abfahrtszeitwahl (in Grau) im Ablaufschema des gesamten MIV- bzw. ÖV-Modells	42
Abbildung 12: Übersicht Verfahrensgruppen im MIV-Modell.....	49
Abbildung 13: Integration des Strassengüterverkehrs als Vorbelastung über ein Strecken-BDA	52
Abbildung 14: PW-Routenwiderstandsfunktion	52
Abbildung 15: Befristete Attribute im MIV-Modell.....	54
Abbildung 16: Übersicht Verfahrensgruppen im ÖV-Modell.....	56
Abbildung 17: Ermittlung der ÖV-Teilweg-Kenngrösse.....	58
Abbildung 18: Tarifpunkte im ÖV-Modell	60
Abbildung 19: Verfahrensgruppen im ÖV-Modell	60
Abbildung 20: Nachfrageberechnung in Grau im Ablaufschema des Gesamtmodells (Dynamische Umlegung inklusive Wahl der Abfahrtszeit).....	62
Abbildung 21: Verfahrensgruppen im Nachfragemodell zu Beginn der Rückkopplungsrechnung.....	62
Abbildung 22: Verfahrensgruppen im Nachfragemodell zu Ende der Rückkopplungsrechnung	63
Abbildung 23: Abbruchkriterium im Nachfragemodell	63
Abbildung 24: Festlegung der Umlegungsmodelle und Pfaddatei.....	64
Abbildung 25: Verrechnung der PW-Kenngrösse Maut mit den PW-Kenngrösse Kosten	64
Abbildung 26: Verrechnung der ÖV-Kenngrösse Kosten mit den ÖV-Kosten aus dem Umlegungsmodell.....	65

Abbildung 27: Übernahme gesperrter ÖV-Relationen für die ÖV-Kenngrösse Fahrtzeit	65
Abbildung 28: Übersicht Stadtgrenze Luzern	67
Abbildung 29: Veränderung der PW-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrix- summen) zwischen Null- und Anwendungsfall	70
Abbildung 30: Veränderung der PW-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall.....	70
Abbildung 31: Veränderung der KG-Differenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen der Distanz und von T_Akt) zwischen Null- und Anwendungsfall.....	71
Abbildung 32: Veränderung der ÖV-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrix- summen) zwischen Null- und Anwendungsfall	72
Abbildung 33: Veränderung der ÖV-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall.....	72
Abbildung 34: Absolute Veränderung der PW-Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall.....	73
Abbildung 35: Relative Veränderung der PW Nachfrage-Differenzmit Berücksichtigung der Modus- und Zielwahl (durchgezogene Linie) und konstanter Nachfrage (strichlierte Linie) zwischen Null- und Anwendungsfall	73
Abbildung 36: Absolute Veränderung der ÖV-Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall.....	74
Abbildung 37: Relative Veränderung der ÖV Nachfrage-Differenz mit Berücksichtigung der Modus- und Zielwahl (durchgezogene Linie) und konstanter Nachfrage (strichlierte Linie) zwischen Null- und Anwendungsfall	74
Abbildung 38: Übersicht: Agglomeration Luzern.....	75
Abbildung 39: Einstellungen im Routenwahlwiderstand.....	75
Abbildung 40: Verfahrensschritt zur Korrektur der temporären Gewichtung bei km-Pricing	76
Abbildung 41: Veränderung der PW-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrix- summen) zwischen Null- und Anwendungsfall	78
Abbildung 42: Veränderung der PW-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall.....	78
Abbildung 43: Veränderung der KG-Differenz (zeitscheibenfeine Matrix- summen der Distanz und von T_Akt) zwischen Null- und Anwendungsfall.....	79
Abbildung 44: Veränderung der ÖV-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrix- summen) zwischen Null- und Anwendungsfall	80
Abbildung 45: Veränderung der PW-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall.....	80
Abbildung 46: Absolute Veränderung der PW-Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall.....	81
Abbildung 47: Relative Veränderung der PW Nachfrage-Differenzmit Berücksichtigung der Modus- und Zielwahl (durchgezogene Linie) und konstanter Nachfrage (strichlierte Linie) zwischen Null- und Anwendungsfall.	81
Abbildung 48: Absolute Veränderung der ÖV-Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall.....	82
Abbildung 49: Relative Veränderung der ÖV Nachfrage-Differenzmit Berücksichtigung der Modus- und Zielwahl (durchgezogene Linie) und konstanter Nachfrage (Nullfall oF, strichlierte Linie) zwischen Null- und Anwendungsfall.....	83
Abbildung 50: Übersicht des Streckennetzes mit zusätzlicher IV-Kapazität	85

Abbildung 51: Festlegung des befristeten Attributs «Kapazität IV»	85
Abbildung 52: Relative Differenz in der ÖV-Kapazität dargestellt als Streckensumme in der Zeitscheibe 7.00-7.15 Uhr	86
Abbildung 53: Veränderung der PW-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall	87
Abbildung 54: Veränderung der PW-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall	87
Abbildung 55: Veränderung der KG-Differenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen der Distanz und von T_Akt) zwischen Null- und Anwendungsfall.....	88
Abbildung 56: Veränderung der ÖV-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall	89
Abbildung 57: Veränderung der ÖV-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall.	89
Abbildung 58: Veränderung der KG-Differenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen der Umsteigehäufigkeit und ÖV-Auslastung) zwischen Null- und Anwendungsfall	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aggregation der 26 QZG im Binnenverkehr zu 10 aggregierten QZG.....	30
Tabelle 2: Kennwerte ÖV Umlegungsanalyse	32
Tabelle 3: Gewählte Parameter der MIV-Nutzenfunktion	46
Tabelle 4: Gewählte Parameter der ÖV-Nutzenfunktion	47
Tabelle 5: Testszenario A: Veränderungen DWV Nachfrage.....	69
Tabelle 6: Testszenario B: Ergebnis Nachfrage DWV	77
Tabelle 7: Übersicht der Rechenzeiten und Dateigrößen im Szenario C.....	84

Abkürzungsverzeichnis

oF	Nullfall
AP	Analyseperiode
ASP	Abendspitzenstunde
ASTRA	Bundesamt für Strassen
bzgl.	bezüglich
BAV	Bundesamt für Verkehr
BDA	Benutzerdefiniertes Attribut in Visum
DWV	Durchschnittlicher Werktagsverkehr
DUE	dynamische Gleichgewichtsumlegung
ϵ	stochastischer Nutzen (Epsilon)
EVA	Erzeugung, Verteilung und Aufteilung, Nachfragemodul in Visum
GG	Gleichgewicht
GVM	Gesamtverkehrsmodell
KG	Kenngrosse
(M)IV	(Motorisierter) Individual Verkehr
M	Nachfrage
MNL	multinomiales Logit-Modell
MSP	Morgenspitzenstunde
MZMV	Mikrozensus Mobilität und Verkehr
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell
ÖV	Öffentlicher Verkehr
P-km	Personen-Kilometer
PAR	Parameter
QZG	Quelle-Ziel-Gruppe
SBA	simulationsbasierte dynamische Umlegung
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SP	Stated Preference
V	deterministischer Nutzen
VISUM	Makroskopische Verkehrsmodellierungssoftware der PTV Group
VVL	Verkehrsverbund Luzern

Zusammenfassung

Das Projektziel war die Erstellung von Grundlagen für die Bewertung von Massnahmen zur Beeinflussung von Tagesganglinien der Verkehrsnachfrage, welches durch das erwartete Resultat, ein praxistaugliches dynamisches Verkehrsmodell für MIV und ÖV inklusive Wahl der Abfahrtszeit, erreicht wurde. Damit können verkehrliche Massnahmen wie dynamisches Mobility Pricing sowie sonstige zeitliche Angebotsänderungen wie z.B. Pannestreifennutzung oder Kapazitätserweiterungen zu Spitzenstunden und Tagesganglinien im Prognosezustand besser modelliert werden.

Der erstellte Modellansatz und die Skripte sind auf andere makroskopische Verkehrsmodelle mit der gleichen Software (Visum 2024/EVA der PTV Group) von privaten Betreibern, Kantonen oder des Bundes übertragbar. Das Konzept kann auch in anderen Verkehrsmodellsoftwareprodukte implementiert werden.

Das Forschungsprojekt basiert auf der Integration von bekannten Verfahren und deren Weiterentwicklung zur Wahl der Abfahrtszeit kombiniert mit der dynamischen Umlegung. Die Literatur- und Methodenrecherche zeigte verschiedene Ansätze für Verteilungsmechanismen für zeitnahe Verschiebung der Abfahrtszeit im ÖV und MIV auf.

Durch die Anwendung des GVM Luzern als Analysemodell für den gesamten Modelllauf inklusive Modus- und Zielwahl und durch die Anwendung des Modellschritts «Wahl der Abfahrtszeit und dynamische Umlegung» beim NPVM wurden die Risiken von extrem langen Rechenzeiten bei der Modellentwicklung minimiert.

Für das GVM Luzern wurden aus dem Werktagsmodell ein dynamisches MIV und ÖV Modell erstellt. Dabei wurden mit Hilfe der Quelle-/Ziel-Gruppen (QZG) ¼-stundenfeine Nachfragescheiben erstellt. Im ÖV konnte die bewährte fahrplanfeine Umlegung direkt verwendet werden, da mit ihr auch die für den Verschiebungsmechanismus interessanten Kenngrössenmatrizen berechnet werden können.

Im MIV ist die Situation anders gelagert. Es gibt in Visum drei verschiedene dynamische Umlegungsverfahren, welche alle signifikante Nachteile haben, welche gegen eine Anwendung im vorliegenden Projekt sprachen.

Das «Simulation based Assignment» (SBA) konnte aufgrund des Aufbaues der Strassenmodelle in der Schweiz (insbesondere Detaillierungsgrad der Knotenpunkte) und fehlender Softwarelizenzen nicht näher betrachtet werden. Es wurden zunächst zwei entsprechende Umlegungsverfahren «Dynamische Gleichgewichtsumlegung» (DUE) und «Dynamisch-stochastische Umlegung» in der Software PTV VISUM 2024 getestet.

Das Umlegungsverfahren «Dynamische Gleichgewichtsumlegung» (DUE) zeigt in den Tests im GVM Luzern bereits lange Rechenzeiten von >15h und in der Umlegungsanalyse stark abweichende zeitscheibenfeine Modellwerte im Vergleich zu den entspre-

chenden Zählwerten. Die starken Abweichungen liegen vermutlich begründet im speziellen Streckenwiderstandsmodell des Verfahrens, welches umfangreiche Kalibrationsarbeiten benötigt, des Weiteren können in diesem Ansatz auch die bestehenden Anbindungsgewichte nicht berücksichtigt werden.

Das Verfahren «Dynamisch-stochastische Umlegung» zeigte in den Testrechnungen die vielversprechendsten Ergebnisse. Die Rechenzeiten liegen bei ca. 1h und die Umlegungsanalyse mit zeitscheibenfeinen Zählwerten zeigt einen mittleren relativen Fehler von ca. 10%. Es zeigte sich, dass mit diesem Ansatz allerdings die Berücksichtigung einer dynamischen (zeitscheibenfeinen) Maut als Widerstand in der Umlegung nicht möglich ist.

Folglich musste zur Berechnung einer dynamischen IV-Umlegung ein neuer Ansatz entwickelt werden. Der gewählte Ansatz sieht dabei die Verwendung einzelner zeitscheibenfeiner statischer IV-Gleichgewichtsumlegungen vor. Dazu müssen jeweils anteilig die vor- und nachlaufenden Wege aus anderen Zeitscheiben berücksichtigt werden, d.h. alle Wege, die in der jeweils betrachteten Zeitscheibe auf dem Netz unterwegs sind.

Als modelltechnische Grundlage für den Verschiebungsmechanismus zwischen einzelnen Zeitscheiben wird ein multinomiales Logit-Modell (MNL) gewählt, in welchem eine Zeitscheibe jeweils einen deterministischen Nutzen aus beobachtbaren Eigenschaften (z.B. Betrag einer geltenden Maut) und variierende, stochastische Nutzen aus individuellen, wahrnehmungsabhängigen Eigenschaften (z.B. individuelle Wahrnehmung des Mautbetrages) zugewiesen bekommt. Der deterministische Nutzen kann dabei als Funktion von Attributen modelliert werden, wo hingegen der stochastische Nutzen indirekt durch die logistische Form des Wahlmodells als Gumbel-verteilte Größe berücksichtigt wird.

Als Grundlage für die Berechnung des deterministischen Nutzens einer Zeitscheibe wird im vorliegenden Projekt der gängige «Scheduling Model»-Ansatz von Small verwendet. Im Kern enthält dieser Ansatz die Annahme über einen negativen Nutzen, der in Abhängigkeit der Abweichung von einer gewünschten Ankunfts- oder Abfahrtszeit entsteht.

Die Berechnung der zeitscheibenfeinen Nachfrage erfolgt auf der Basis zweier Wirkmechanismen. Zum einen berechnet das Logit-Modell eine zeitscheibenfeine Nachfrage auf Basis eines zeitscheibenfeinen Nutzens, was bei einer Änderung dieses Nutzens zu einer Verschiebung der Nachfrage zwischen den Zeitscheiben führt. Dieser wird in der «unkorrigierten» zeitscheibenfeinen Nachfragematrix abgebildet.

Zum anderen wird die so berechnete zeitscheibenfeine Nachfrage noch über eine Korrekturmatrix angepasst. Erst danach ist die endgültige zeitscheibenfeine Nachfrage berechnet. Die Korrekturmatrix wird als Differenz (bzw. Verhältnis) zwischen der mit dem Logit-Modell berechneten zeitscheibenfeinen Nachfragematrix und einer aus dem erhobenen Tagesgang des MZMV abgeleiteten, zeitscheibenfeinen Matrix gebildet.

Dies erfolgt im Analyse- bzw. Nullfall. In der Korrekturmatri­x stecken somit Nutzeninfor­mationen, die bisher weder durch den deterministischen noch den darauf basieren­den stochastischen Teil des bisher berücksichtigten Nutzens abgebildet werden.

Im Prognose- bzw. Anwendungsfall werden die zeitscheibenfeinen Korrekturmatri­zen dann als Differenzmatrix (bzw. Faktormatrix) auf die mit dem Logit-Modell für den Prognosenutzen berechneten zeitscheibenfeinen Nachfragematri­zen aufsummiert (bzw. multipliziert). Es entsteht folgende «korrigierte» zeitscheibenfeine Nachfrage­matrix (auf Basis der Differenz bzw. des Verhältnisses). In den späteren Testszenarien wird standardmässig eine Verrechnung der Korrekturmatri­zen mit Wirkanteilen von 50/50 zwischen Differenz- und Verhältnismatri­zen festgelegt. Die Parameter zur Abfahrtszeitwahl wurden aus der nationalen SP-Studie 2021 übernommen.

Danach werden die verschiedenen Resultate der Arbeitspakete durch die Erweiterung der Modellstruktur um die Wahl der Abfahrtszeit (mit und ohne Ziel-/Moduswahl) zu­sam­menge­führt und lauffähig gemacht.

Zum Abschluss wurden die Modellweiterentwicklungen mit drei verschiedenen Test­zenarien im GVM Luzern und im NPVM validiert. Bei der Definition der Testszena­rien stand im Vordergrund die Wirkung verschiedener Pricingssysteme bzw. Kapazi­­täterweiterungen in der Morgenspitze für den ÖV und MIV zu überprüfen. Dies sind keine verkehrspolitischen Szenarien im eigentlichen Sinn, sondern dienen nur der Va­lidierung der Rechenverfahren.

Betrachtet für die Wahl der Abfahrtszeit wird der Zeitraum zwischen 06:00 bis 9:00 Uhr im Sinne einer möglichen Verschiebung der Abfahrtszeit innerhalb der morgend­lichen Spitzenzeitperiode. Die preislichen bzw. kapazitätserhöhenden Massnahmen sind immer in der Morgenspitzenstunde von 7 bis 8 Uhr wirksam, wobei die maximal zulässige Verschiebung für Fahrten innerhalb dieses Zeitraums auf eine Stunde festge­legt wird.

Testszenario A wurde im GVM Luzern inklusive einer EVA-Nachfrageberechnung (Ziel- und Moduswahl) durchgeführt. Angenommen wird ein Kordonpricing von 7 bis 8 Uhr an den Grenzen der Stadt Luzern für den PW (exkl. Autobahn A2) und ÖV (exkl. Fernverkehr Bahn) mit folgender Bepreisung: ÖV-Weg 1 CHF und PW-Fahrt 3 CHF. Es wurden auch zwei Sensitivitätsrechnungen (+50% bzw. -30% zeitliche Bepreisung) durchgeführt.

Testszenario B wurde im GVM Luzern inklusive einer EVA-Nachfrageberechnung (Ziel- und Moduswahl) durchgeführt. Angenommen wird ein km-basiertes Gebietspri­cing innerhalb Stadt und Agglomeration Luzern (inkl. Autobahn A2, aber exkl. Fern­verkehr Bahn) von 7 bis 8 Uhr mit der Bepreisung von 10 Rp pro P-km im ÖV und 13.4 Rp pro PW-km für PW. Damit beträgt der Preis je Personen-km sowohl im ÖV als auch beim PW 10Rp innerhalb des Pricinggebiets. Es wurden auch zwei Sensitivitätsrech­nungen (+50% bzw. -30% der zeitlich beschränkten Maut) durchgeführt.

Das Testszenario C wird im NPVM ohne Berücksichtigung einer EVA-Nachfragebe­rechnung (Ziel- und Moduswahl), sondern unter ausschliesslicher Betrachtung der

Routen- und Abfahrtszeitwahl durchgeführt. Für das PW-Szenario wird eine zusätzliche Streckenkapazität auf mehrspurigen Autobahnen und -strassen zwischen 7-8 Uhr durch eine mögliche Pannestreifenutzung angenommen. Im ÖV wird eine Verdopplung der Verdichtungskurse für Trassenkategorie C und D im Regionalverkehr der Bahn in der gesamten Schweiz angenommen. Die Definition der Verdichtungskurse in der Hauptverkehrszeit (HVZ) stammt aus dem SBB-Systemfahrplan, welcher im NPVM hinterlegt ist. Durch die Kopie dieser Linien, bleiben die Beförderungszeit, Intervall, Anzahl Umsteigen etc. konstant, aber die ÖV-Kapazität im Regionalverkehr erhöht (meist verdoppelt) sich.

Die Schlussfolgerungen aus den Testszenarien lassen sich wie folgt zusammenfassen. Die Implementierung von zeitabhängigen Pricing Systemen im ÖV zeigt sich als sehr arbeitsintensiv, da die betroffenen Kurse aus der Liniendefinition extrahiert und zu einem neuen Verkehrssystem zugeordnet werden müssen. Die Anpassung verschiedener ÖV-Pricinghöhen lässt sich schnell durchführen. Im Strassennetz sind die Definitionen gut umsetzbar.

Die Auswertungen zeigen eine Abnahme der Nachfrage im Anwendungsfall für den Zeitraum von 06:30-7:45 Uhr. In den anderen betrachteten Zeiträumen (06:00–06:30 Uhr und 7:45–09:00 Uhr) ist hingegen eine Zunahme der Nachfrage zu verzeichnen. Erwartungsgemäss ist dieses Verhalten sowohl in der korrigierten Nachfrage als auch in der unkorrigierten Nachfrage zu erkennen.

Durch die Glättung der Nachfrage werden die PW-Fahrzeiten unter Belastung geringer, was die Angebotsverhältnisse zu Gunsten des PW verschiebt, und dadurch gewinnt er Marktanteile. Die ÖV-Fahrzeiten bleiben aber aufgrund des konstanten Fahrplans im Modell gleich (In Realität verlängern sich bei zu hoher ÖV-Auslastung die Fahrzeiten durch den verlängerten Zeitbedarf für den Fahrgastwechsel). Auch zeigte sich, dass alle Kenngrössen schon im Basismodell (Nullfall) enthalten und kalibriert sein sollten, was insbesondere bei der ÖV-Auslastung noch nicht Stand der Praxis in der Schweiz ist.

Bei der Anwendung des NPVM für die Umlegung und Wahl der Abfahrtszeit ergeben sich Rechenzeiten von ca. 16 Stunden je Modus und Dateigrössen um die 50 GB. Weiters ist zu beachten, dass bei einem grösser gewählten betrachteten Zeitraum und einer weitergefassten zulässigen Verschiebungszeit deutlich andere Rechenzeiten entstehen können. Insgesamt liegt das NPVM aufgrund seiner Modellgrösse mit der verwendeten Rechnerleistung (64 Kerne und 256 GB RAM) im rechentechnischen Grenzbereich. Bei der Anwendung des GVM Luzern inkl. Nachfrageberechnung sind die Rechenzeiten mit ca. 30min und ca. 3 GB Dateigrösse im überschaubaren Rahmen.

Die Resultate der Testszenarien zeigen für die Abfahrtszeit- und Routenwahl sinnvolle Resultate, welche im Bereich der Erwartungswerte und Erfahrung in Projekten mit einfacheren Modellansätze liegen. Bei der EVA-Nachfrageberechnung (Ziel- und Moduswahl) konnten mögliche Verbesserungsvorschläge aufgezeigt werden.

Im vorliegenden Projekt wurde ein Ansatz zur Abbildung der Abfahrtszeitwahl im makroskopischen Verkehrsmodell entwickelt. Dieser Ansatz ermöglicht eine verhältnismässig einfache Ergänzung einer Abfahrtszeitwahl in bestehenden Modellen, ist aber nicht als «Plug and Play»-Ansatz zu betrachten.

Es existieren für diesen Ansatz sehr viele Einstellmöglichkeiten, welche neben dem möglichen Ergebnis auch grossen Einfluss auf das generelle «Handling» (Rechenzeiten, Dateigrössen etc.) haben. Gleichzeitig muss beachtet werden, dass die Komplexität des Modells auch inhaltlich deutlich zunimmt und mögliche Kalibrierungsarbeiten am Modell damit umfangreicher ausfallen.

Die dynamische Betrachtung des Verkehrsgeschehens ist aber sicherlich eine wichtige Perspektive für die Zukunft, um die Nachfrage und das Angebot realistischer abzubilden und eine umfassende Bewertung von Projekten zu ermöglichen.

Résumé

L'objectif du projet était d'établir des bases d'évaluation de mesures pour influencer les distributions horaires du trafic journalier dans les modèles de transport afin de représenter le choix de l'heure de départ du transport de personnes aux heures de pointe. Le résultat obtenu offre une extension transférable pour l'intégration du choix des heures de départ dans les modèles de transport macroscopiques actuellement utilisés pour le TIM et les TP.

Cette extension permet de mieux modéliser les mesures du transport telles que la tarification dynamique de la mobilité (Mobility Pricing) ainsi que d'autres modifications temporelles de l'offre, telles que l'utilisation des bandes d'arrêt d'urgence ou l'augmentation de la capacité aux heures de pointe et, globalement, les distributions horaires du trafic journalier dans les perspectives du transport.

L'approche de modélisation développée et les scripts sont transposables à d'autres modèles de transport macroscopiques des acteurs privés, de cantons ou de la Confédération, avec la même spécification de modèle (version logicielle PTV Visum 2024 et modèle de demande EVA). Le concept peut également être implémenté dans d'autres logiciels de modélisation du trafic.

Le projet de recherche est basé sur l'intégration de méthodes établies et leur modification pour le choix de l'heure de départ combiné avec l'affectation dynamique. La recherche bibliographique et méthodologique a mis en évidence différentes approches de mécanismes de répartition pour le décalage de l'heure de départ dans les TP et le TIM.

Le modèle de Lucerne a été utilisé pour le développement de l'approche. Dans le cadre de la rétroaction entre les étapes du modèle, l'ensemble des étapes du modèle, y compris le choix de la destination et du mode, a été pris en compte et complété par les étapes du modèle "choix de l'heure de départ et affectation dynamique". Ces dernières étapes ont également été testées afin de vérifier les temps de calcul extrêmement longs qui peuvent survenir dans les grands modèles. On a toutefois renoncé ici à prendre en compte le choix de la destination et du mode.

Pour le modèle de Lucerne, un modèle dynamique TIM et TP a d'abord été créé à partir du modèle de trafic journalier moyen des jours ouvrables (TJMO). Des tranches de demande au quart d'heure ont été créées sur la base des groupes origine-destination (QZG). Dans le cas des TP, il a été possible d'utiliser directement l'affectation éprouvée en fonction de l'horaire, car elle permet également de calculer les matrices de caractéristiques intéressantes pour le mécanisme de décalage.

Dans le cas du TIM, la situation était différente. Il existe dans Visum trois méthodes de l'affectation dynamique différentes, qui présentent toutes des inconvénients significatifs qui plaident contre leur application dans la présente approche.

La méthode "Simulation based Assignment" (SBA) a été rejetée dès le départ, car un examen plus approfondi n'a pas été jugé pertinent en raison de la structure courante

des modèles de réseaux routiers en Suisse (notamment en ce qui concerne le degré de détail des nœuds) et de l'absence de licences de logiciels.

Dans le cadre du présent projet, les deux méthodes de l'affectation restantes, à savoir "l'affectation dynamique à l'équilibre" (DAE) et "l'affectation dynamique stochastique" (ADS), ont donc été testées dans le logiciel PTV VISUM 2024.

La méthode de "l'affectation dynamique à l'équilibre" (DAE) a montré, lors des tests effectués au modèle de Lucerne, des temps de calcul déjà longs (>15h) et, dans l'analyse de l'affectation, des valeurs de modèle très différentes des valeurs de comptage correspondantes. Ces écarts importants sont probablement dus au modèle de résistance des trajets spécifique de la méthode, qui nécessite des travaux de calibrage importants. En outre, cette approche ne permet pas de prendre en compte les poids des connecteurs existants.

La méthode de "l'affectation dynamique-stochastique" a donné les résultats les plus prometteurs dans les calculs d'essai. Dans le modèle de Lucerne, les temps de calcul étaient d'environ 1h et l'analyse de l'affectation avec des données de comptage différenciés par temps a montré une erreur relative moyenne d'environ 10%. Il s'est toutefois avéré problématique que cette approche ne permette pas de prendre en compte une tarification dynamique (par temps) comme facteur d'impédance dans l'affectation. Par conséquent, une nouvelle approche a dû être développée pour le calcul de l'affectation dynamique du TIM. L'approche choisie prévoit l'utilisation de l'affectations du TIM d'équilibre statiques, différenciés par temps. Pour cela, il faut prendre en compte proportionnellement les trajets en amont et en aval d'autres tranches horaires. Les mécanismes de rétroaction et les contrôles de convergence nécessaires ont été ajoutés dans Visum à l'aide de scripts.

Un modèle logit multinomial (MNL) est choisi comme base pour modéliser le mécanisme de décalage entre les différentes tranches de temps, dans lequel une tranche de temps se voit attribuer une utilité déterministe issue de propriétés observables (p. ex. montant d'une tarification en vigueur) et des utilités stochastiques issues de propriétés individuelles dépendant de la perception (p. ex. perception individuelle du montant de la tarification). L'utilité déterministe peut être modélisée comme une fonction des attributs, alors que l'utilité stochastique est prise en compte indirectement par la forme logistique du modèle (distribuée selon Gumbel).

L'approche courante du "Scheduling Model" de Small est utilisée dans le présent projet comme base de calcul de l'utilité déterministe d'une tranche horaire. Cette approche s'agit essentiellement de l'hypothèse d'une utilité négative qui survient en fonction de l'écart par rapport à une heure d'arrivée ou de départ souhaitée.

Le calcul de la demande affinée en tranches temporelles se fait sur la base de deux mécanismes. D'une part, le modèle Logit calcule une demande affinée en tranches de temps sur la base d'une utilité affinée en tranches de temps, ce qui entraîne un décalage de la demande entre les tranches de temps en cas de modification de cette utilité. Celui-ci est représenté dans une matrice de demande affinée en tranches temporelles "non corrigée".

D'autre part, la demande par tranche horaire ainsi calculée est encore modifiée à l'aide d'une matrice de correction. Ce n'est qu'ensuite que la demande finale en tranches de temps est calculée. La matrice de correction est la différence (respectivement le rapport) entre la matrice de la demande en tranches de temps calculée par le modèle logit et une matrice en tranches de temps dérivée du micro recensement mobilité et transports (MRMT). Cela se fait dans l'état de base du modèle. La matrice de correction contient donc des informations sur l'utilité qui, jusqu'à présent, ne sont représentées ni par la partie déterministe ni par la partie stochastique de l'utilité prise en compte.

Dans le cas de la prévision ou de l'application, les matrices de correction en tranches de temps sont ensuite additionnées (respectivement multipliées) en tant que matrice de différence (matrice de facteurs) sur les matrices de demande en tranches de temps calculées avec le modèle Logit pour l'utilité de la prévision. On obtient la matrice de demande par tranche de temps "corrigée" suivante (sur la base de la différence ou du rapport). Dans les scénarios ultérieurs, on définit par défaut une considération des matrices de correction avec des parts d'effet de 50/50 entre les matrices de différence et de rapport. Les paramètres de sélection des heures de départ ont été dérivés de l'étude nationale SP 2021.

Les résultats de ces travaux ont été réunis et rendus opérationnels par l'extension correspondante de la structure du modèle. Des étapes de procédure supplémentaires ont été intégrées, comme pour l'extrapolation des matrices caractéristiques de 1/4 h à des valeurs de 24 h et pour la décomposition de la demande de 24 h en valeurs de 1/4 h en relation avec la rétroaction dans le calcul de la demande EVA (choix de destination et du mode).

Pour finir, les développements du modèle ont été validés avec deux scénarios différents dans le modèle de Lucerne et un dans le modèle national MNTP. Lors de la définition des scénarios, l'objectif principal était de vérifier l'effet de différents systèmes de tarification ou d'augmentation des capacités aux heures de pointe du matin pour les TP et le TIM. Ils ne constituent pas des scénarios réels de politique des transports, mais servent uniquement à valider les méthodes de calcul.

La période prise en compte pour le choix de l'heure de départ est celle comprise entre 6h00 et 9h00, dans le sens d'un décalage possible de l'heure de départ au sein de la période de pointe du matin. Les mesures de tarification ou d'augmentation de la capacité sont toujours effectives pendant l'heure de pointe du matin, de 7 à 8 heures, le décalage maximal autorisé pour les trajets ayant été fixé à une heure.

Le scénario A a été réalisé dans le modèle de Lucerne, y compris un calcul de la demande EVA (choix de la destination et du mode). On suppose une tarification de cordon de 7 à 8 heures aux limites de la ville de Lucerne pour les véhicules privés (VP) (hors autoroute A2) et les TP (hors trafic ferroviaire à longue distance) à hauteur de 1 CHF par trajet en TP et de 3 CHF par trajet en VP privé. Deux calculs de sensibilité (+50% et -30% de tarification horaire) ont également été effectués.

Le scénario B a été réalisé dans le modèle de Lucerne, y compris un calcul de la demande EVA (choix de la destination et du mode). On suppose une tarification territoriale basée sur le km à l'intérieur de la ville et de l'agglomération de Lucerne (y compris

l'autoroute A2, mais sans le trafic ferroviaire à longue distance) de 7 à 8 heures avec une tarification de 0.10 CHF par P-km pour les TP et de 0.134 CHF par VP-km pour les VP. Le prix par personne-km est donc de 0.10 CHF dans la zone de tarification, tant pour les TP que pour les VP. Deux calculs de sensibilité (+50% et -30% de la tarification limité dans le temps) ont également été effectués.

Le scénario C a été réalisé dans le MNTP sans tenir compte d'un calcul de la demande EVA (choix de la destination et du mode), mais en considérant uniquement le choix de l'itinéraire et de l'heure de départ. Pour le scénario VP, on suppose une capacité supplémentaire sur les autoroutes et routes à plusieurs voies entre 7 et 8 heures grâce à une utilisation possible des bandes d'arrêt d'urgence. Dans les TP, on suppose un doublement des courses de densification pour les catégories de trains C et D (trains aux heures de point) dans le trafic ferroviaire régional dans toute la Suisse. La définition des courses de densification aux heures de pointe provient de l'horaire des CFF, qui est déposé dans le MNTP. En copiant ces lignes, le temps par trajet, l'intervalle, le nombre de correspondances, etc. restent constants, mais la capacité des TP en trafic régional augmente (double généralement).

Les conclusions des scénarios peuvent être résumées comme suit. La mise en œuvre d'une tarification en fonction du temps dans les TP s'avère très laborieuse, car les courses concernées doivent être extraites des lignes et affectées à un nouveau système de transport. En revanche, l'adaptation de différents niveaux de tarification des TP peut être réalisée rapidement. Dans le réseau routier, les définitions sont faciles à mettre en œuvre.

Les évaluations montrent une diminution de la demande de VP et de TP pour la période de 06h30-7h45. En revanche, on constate une augmentation de la demande dans les autres périodes considérées (06:00-06:30 et 7:45-09:00). Comme on pouvait s'y attendre, ce comportement se retrouve aussi bien dans la demande corrigée que dans la demande non corrigée.

En ce qui concerne le calcul de la demande (choix de la destination et du mode), les temps de parcours en voiture sous charge diminuent grâce au lissage de la demande sur la période considérée. Cela déplace les rapports d'offre en faveur de la voiture privée, qui gagne ainsi des parts de répartition modale. En revanche, les temps de transport public restent identiques en raison de l'horaire constant. Dans ce contexte, il s'est également avéré que toutes les matrices caractéristiques devraient déjà être contenues et calibrées dans le modèle de base, ce qui n'est pas encore l'état de la pratique en Suisse, en particulier pour le taux d'occupation du matériel roulant des TP.

L'utilisation du MNTP pour l'affectation et le choix de l'heure de départ entraîne des temps de calcul d'environ 16 heures par mode et des tailles de fichiers d'environ 50 Go. Il est de noter que des temps de calcul nettement plus longs peuvent être générés si la période considérée est choisie plus grande et si le temps de décalage admissible est plus large. Dans l'ensemble, une application dans le MNTP se situe à la limite de la technique de calcul en raison de la taille du modèle et de la puissance d'ordinateur utilisé (64 cœurs et 256 Go de RAM). Dans le cas de l'application du modèle de Lucerne, y

compris le calcul de la demande, les temps de calcul sont d'environ 30 minutes et la taille des fichiers d'environ 3 Go, ce qui reste dans des limites raisonnables.

Les résultats des scénarios montrent des résultats raisonnables pour le choix de l'heure de départ et de l'itinéraire, qui se situent dans la plage des valeurs attendues et de l'expérience acquise dans des projets avec des approches de modélisation plus simples. Pour une utilisation dans le cadre d'un calcul de la demande EVA (choix de la destination et du mode), des propositions d'amélioration possibles ont pu être mises en évidence.

L'approche développée dans le présent projet permet de compléter relativement facilement l'intégration d'un choix d'heure de départ dans les modèles de transport macroscopiques existants. Dans ce contexte, elle ne doit toutefois pas être considérée comme une approche "plug and play".

La raison en est qu'il existe de nombreuses possibilités de réglage pour l'approche, ce qui, outre le résultat possible, a une grande influence sur l'application générale (temps de calcul, taille des fichiers, etc.). En même temps, il faut tenir compte du fait que la complexité du modèle augmente aussi nettement au niveau du contenu et que les éventuels travaux de calibrage du modèle sont donc plus importants.

L'approche dynamique du trafic est certainement la perspective d'avenir pour représenter de manière plus réaliste la demande et l'offre et pour permettre une évaluation complète des projets. L'approche développée dans ce projet offre une base étendue à cet effet.

.

Summary

The project goal was to establish fundamentals to analyse factors to influence the temporal distribution of travel demand. This can be achieved through the expected project results of a dynamic transport model for both private and public transport, including the choice of departure time. With this tool, it is possible to model dynamic mobility schemes or other temporary supply-side changes, such as emergency lane use or capacity expansion during peak hours. Furthermore, the model can be applied to more accurately forecast the temporal distribution of travel demand in future scenarios.

The tool developed can be applied in different transport models established with the same software (Visum 2024/EVA of PTV Group) and is useful for both private companies and authorities at the Cantonal and Federal levels. The concept could also be applied to other transport modelling software products.

The research project is based on integrating well-established methods and further developing them for the selection of departure times, combined with dynamic assignment. The literature and method research revealed various approaches for distribution mechanisms that allow for promptly shifting departure times in both public and private transport.

The project concept is based on the integration of well-known procedures and their extension for departure time choice combined with dynamic assignment. The literature and method research revealed various approaches for distribution mechanisms to promptly shift the departure time in both public and private transport.

Using the GVM Lucerne as an analysis model for the entire model run, including mode and destination selection, and applying the model step “Selection of Departure Time and Dynamic Reallocation” in the NPVM, the risks of excessively long computing times during model development were minimized.

For the GVM Lucerne, a dynamic model for Motorized Private Transport and Public Transport was created from the working day model. The source/destination groups (QZG) were used to create 1/4-hour demand slices. In public transport, the well-known timetable-based assignment could be applied directly, as it can also be used to calculate the parameter matrices of interest for the shift mechanism.

The situation is different for Motorized Private Transport. There are three different dynamic assignment methods in Visum, each with significant disadvantages that argue against their use in this project.

The ‘Simulation-Based Assignment’ (SBA) could not be further examined due to the layout of the road network models in Switzerland (in particular, the level of detail of the node points) and the lack of software licenses. Initially, two corresponding assignment procedures ‘Dynamic Equilibrium Assignment’ (DUE) and ‘Dynamic Stochastic Assignment’ were tested in the PTV VISUM 2024 software.

The ‘Dynamic Equilibrium Assignment’ (DUE) method already shows long calculation times (>15 hours) in the tests with the GVM Lucerne and significant deviations in the assignment analysis compared to the corresponding traffic counts. These strong deviations are presumably due to the special link impedance function of the method, which requires extensive calibration work. Furthermore, the existing connection weights are not considered in this approach.

The ‘Dynamic Stochastic Assignment’ method showed the most promising results in the test calculations. The calculation times were approximately 1 hour, and the assignment analysis with time-slice fine counting data showed an average relative error of approximately 10%. However, it turned out that this approach does not allow for the consideration of a dynamic (time-slice) toll as an impedance attribute in the assignment.

Consequently, a new approach had to be developed to calculate a dynamic Motorized Private Transport assignment. The selected approach uses individual static Motorized Private Transport equilibrium with fine time slices. For this purpose, earlier and later trips from other time slices must be considered proportionally, meaning all paths traveling on the network in the respective time slice under consideration.

A multinomial logit model (MNL) was selected for the shift mechanism between individual time slices. In this model, a time slice is assigned a deterministic benefit from observable properties (e.g., the amount of a toll in force) and varying, stochastic benefits from individual, perception-dependent properties (e.g., individual perception of the toll amount). The deterministic utility can be modelled as a function of attributes, while the stochastic utility is indirectly influenced by the logistic form of the choice model, modelled as a Gumbel-distributed variable.

In this project, the common ‘Scheduling Model’ approach by Small is used as the basis for calculating the deterministic benefit of a time slice. Essentially, this approach assumes a negative utility that arises depending on the deviation from a desired arrival or departure time.

The calculation of the time-sliced demand is based on two mechanisms. First, the logit model calculates a time-slice-specific demand based on a time-slice-specific benefit, which leads to a shift in demand between time slices when this benefit changes. This is mapped in the ‘uncorrected’ time-slice demand matrix.

Second, the time-slice-specific demand calculated in this way is adjusted using a correction matrix. Only then is the final time-slice demand calculated. The correction matrix is formed as the difference (or ratio) between the time-slice-specific demand matrix calculated with the logit model and a time-slice-specific matrix derived from the daily variation of the MZMV. This is done in the analysis or zero case. The correction matrix, therefore, contains benefit information that has not yet been accounted for by either the deterministic or the stochastic part of the previously considered benefit.

In the forecasting or application case, the time-slice-fine correction matrices are then added (or multiplied) as a difference matrix (or factor matrix) to the time-slice-fine demand matrices calculated with the logit model for the forecasting utility. The result

is the following ‘corrected’ time-slice demand matrix (based on the difference or ratio). In later test scenarios, the calculation of the correction matrices with effective shares of 50/50 between difference and ratio matrices is defined by default. The parameters for departure time selection were taken from the national SP study 2021.

The various results of the work packages were then combined and made executable by extending the model structure to include the choice of departure time (with and without destination/mode selection).

Finally, the model enhancements were validated with three different test scenarios in the GVM Lucerne and NPVM. When defining the test scenarios, the focus was on testing the effect of various pricing systems and capacity expansions during the morning peak for both public transport and motorized private transport. These are not transport policy scenarios in the strict sense but serve only to validate the calculation methods. The period between 06:00 and 09:00 is considered for the choice of departure time in terms of a possible shift of departure times within the morning peak period. The pricing or capacity-increasing measures are always effective in the morning peak hour from 7 a.m. to 8 a.m., with the maximum permissible shift for journeys departing within this period set at one hour.

Test scenario A was carried out in the GVM Lucerne, including an EVA demand calculation (destination and mode choice). A cordon pricing from 7 a.m. to 8 a.m. at the city border of Lucerne for cars (excluding the A2 motorway) and public transport (excluding long-distance rail) was assumed, with the following pricing: public transport journey CHF 1 and car journey CHF 3. Two sensitivity calculations were also carried out (+50% and 30% peak hour pricing).

Test scenario B was carried out in the GVM Lucerne, including an EVA demand calculation (destination and mode choice). A km-based area pricing within the city and agglomeration of Lucerne (including the A2 motorway but excluding long-distance rail traffic) from 7 a.m. to 8 a.m. was assumed, with a price of 10 cents per passenger-km for public transport and 13.4 cents per passenger-km for cars. Two sensitivity calculations (+50% and 30% peak hour pricing) were also carried out.

Test scenario C was carried out in the NPVM without considering an EVA demand calculation (destination and mode choice), but rather exclusively incorporating route and departure time selection. For the car scenario, an additional route capacity on multi-lane motorways and roads between 7-8 a.m. was assumed due to the possible use of breakdown lanes. In public transport, a doubling of the peak-period services for categories C and D in regional rail transport throughout Switzerland was assumed. The definition of peak-period (HVZ) services is taken from the SBB system timetable, which is stored in the NPVM. By copying these lines, the journey time, interval, number of transfers, etc., remain constant, but the public transport capacity in regional transport increases (usually doubles).

The conclusions from the test scenarios can be summarized as follows: Implementing time-dependent pricing systems in public transport is very labor-intensive, as the affected vehicle journeys must be extracted from the route definition and assigned to a new transport system. The adaptation of different public transport pricing levels can

be carried out quickly, and the definitions can be easily implemented in the road network.

The analyses show a decrease in demand during the period from 06:30 to 07:45. In the other time periods considered (06:00-06:30 and 07:45-09:00), however, an increase in demand is observed. As expected, this behaviour is seen in both the corrected and uncorrected demand.

By smoothing demand, car journey times under load are reduced, which shifts the supply ratios in favour of the car, giving it a larger market share. However, public transport times remain the same due to the fixed timetable. It was also shown that all parameters should already be included and calibrated in the base model (zero case), which is not yet standard practice in Switzerland, particularly for the public transport utility function.

Using the NPVM for the reallocation and selection of departure times results in calculation times of approximately 16 hours per mode and file sizes of around 50 GB. It should also be noted that significantly different computing times may result if a larger time period is selected, and the permissible shift time is extended. Overall, the NPVM is at its computing limits due to the size of the model and the computing power used (64 cores and 256 GB RAM). When using the GVM Lucerne, including the EVA demand calculation, the computing times of approximately 30 minutes and a file size of approximately 3 GB are within manageable limits.

The results of the test scenarios show reasonable results for the departure time and route selection, which are within the range of expected values and experiences in projects with simpler modelling approaches. In the EVA demand calculation (destination and mode selection), possible suggestions for improvement were identified.

In this project, an approach for modelling departure time choice in the macroscopic traffic model was developed. This approach enables a relatively simple addition of departure time selection in existing models, but should not be regarded as a 'plug-and-play' approach.

There are many setting options for the approach, which, in addition to the possible result, also have a significant influence on the general 'handling' (computing times, file sizes, etc.). At the same time, it must be noted that the complexity of the model increases significantly in terms of content, and any potential calibration work on the model is therefore more extensive.

The dynamic consideration of the traffic situation is certainly the perspective for the future to depict demand and supply more realistically and to enable a comprehensive evaluation of transport projects.

1 Einleitung

1.1 Problembeschreibung

Die Schwankung der Verkehrsnachfrage während des Tages stellt für die Verkehrs- und Infrastrukturplanung eine grosse Herausforderung dar. In der planerischen Praxis gibt es immer wieder Fragestellungen, in denen die Beeinflussung der Tagesganglinie durch eine zeitlich differenzierte Bemaatung (*dynamic pricing*) zur besseren Nutzung von freien Kapazitäten, ein zusätzliches Kapazitätsangebot (z.B. Pannestreifenutzung zu Spitzenzeiten) oder -reduktion bewertet werden muss. Für die Schweiz hat das Projekt «Mobility Pricing – Wirkungsanalyse am Beispiel der Region Zug» (Sutter et al., 2019) die Bedürfnisse für die Berechnung der möglichen Abfahrtszeitveränderungen infolge von Angebots- und Kostenveränderungen während des Tages sowie die notwendige Erweiterung der modelltechnischen Grundlagen aufgezeigt.

Im Verkehrsgeschehen wird bei Kapazitätsüberlastung bzw. -reduktion das Phänomen des *peak hour spreading* (Downs, 1992) beobachtet, wo Teile der Nachfrage auf die Zeitperiode vor und nach der Verkehrsspitze verschoben werden. Dieser Effekt tritt auch bei zeitabhängiger Bemaatung (*dynamic pricing*), mit Nachfrageverschiebung vor und nach der Pricingperiode, auf. Wenn das Angebot ausgebaut wird, verringert sich die Verschiebung und die Verteilung wird konzentriert (Abbildung 1). Je nach Ausweitung des Angebots verbleibt damit eine kürzere Überlastung des Angebots.

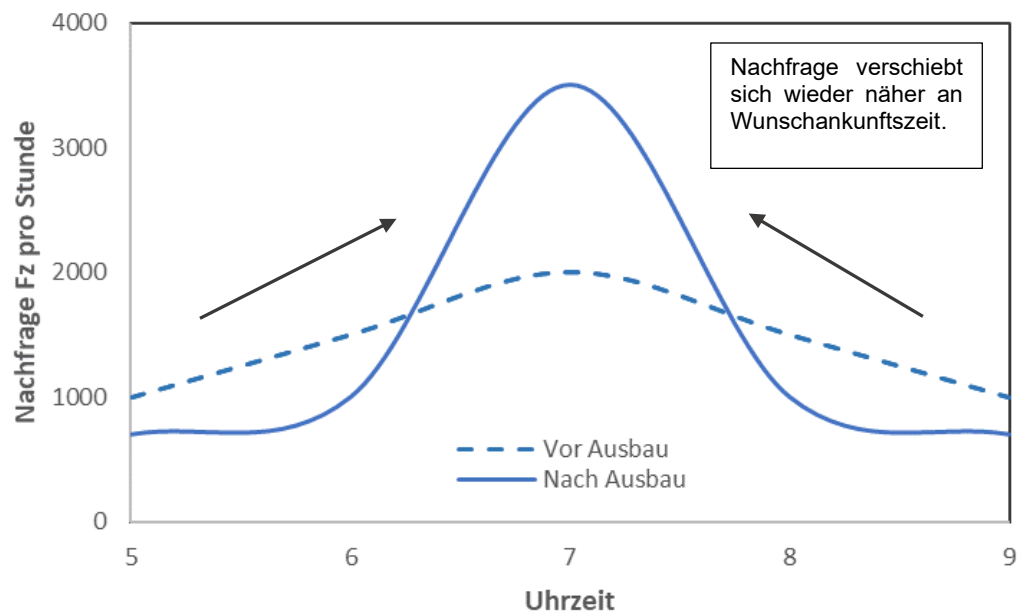


Abbildung 1: Schematische Darstellung Nachfragereaktion bei Angebotsausbau

Die Änderung der Abfahrtszeit ist die zweitwahrscheinlichste Verhaltensänderung bei Angebotsveränderungen, nach Veränderungen in der Routenwahl aber vor Veränderungen in der Moduswahl (Williamsen, 2014). Während die Routen- und Moduswahl

sehr gut erforscht und ihre praktische Umsetzung in Verkehrsmodellen gut dokumentiert sind, klafft bei der Abbildung der Wahl der Abfahrtszeit in Verkehrsmodellen eine Lücke.

Bei anwendungsorientierten Projekten ist zudem meist kaum Zeit, um methodische Weiterentwicklungen, wie die Implementation der Abfahrtszeitwahl, in Modellen zu etablieren. Daher ist es sinnvoll, eine solche Weiterentwicklung in einem eigenständigen Forschungsprojekt vertieft zu behandeln.

1.2 Internationaler Stand der Forschung und Forschungsbedarf

In der Literatur (z.B. Ortuzar und Willumsen, 2011) wird unterschieden zwischen Wahl der Abfahrtszeit mit zeitnaher (*schedule based*) und ganztägiger (Tagesplan oder *time period modelling*) Anpassung. Beim Letztgenannten werden sogenannte Tagespläne für verschiedenen Aktivitäten und ihre Abhängigkeit zueinander nachgebildet, dies wird z.B. auch bei den auf Agenten basierenden Ansätzen (ABM), die Aktivitäten nachgehen, wie in MATSim (Axhausen et al., 2016) durchgeführt. Die Modellierung von signifikanten Veränderungen der Tagespläne mit einhergehenden starken zeitlichen Veränderungen der Verkehrsbelastungen haben oft experimentellen Charakter.

In den aktuellen in Anwendung befindlichen aggregierten Verkehrsmodellen auf Kantons- und Bundesebene sind keine Tagespläne hinterlegt. Die SBB unterhalten mit SIMBA MOBI ein aktivitäten- und agentenbasiertes Modell, welches Variationen in der Abfahrtszeitenwahl berücksichtigt (Scherr et al., 2020).

Bei der Modellierung von zeitnahen Anpassungen (*schedule approach*) ist die Annahme, dass Personen eine gewünschte Abfahrtszeit haben und eine Anpassung der Abfahrtszeit einen negativen Nutzen bedeutet (Small, 1982). Dieser Ansatz wird, falls die Berechnung der Abfahrtszeit überhaupt modelliert wird, in privatwirtschaftlichen Mautprojekten meist verwendet (Willumsen, 2014). Auch lässt sich mit diesem Modellansatz das Phänomen des *peak hour spreading* abbilden.

Im Sprachgebrauch hat sich der Begriff Wahl der Abfahrtszeit festgesetzt, eigentlich ist die gewählte Ankunftszeit aber meist bedeutsamer, weil viele Aktivitäten zu einer vorbestimmten Zeit beginnen, wie z.B. Meetings, Verabredungen, Vorlesungen etc. In Befragungen, wie z.B. dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr, werden die realisierten Abfahrtszeiten der Teilnehmer abgefragt.

Neben der Methodik der zeitlichen Anpassungen sind dynamische Umlegungsmodelle eine Voraussetzung, um die Änderung der Verkehrsbelastungen über den Tag zu berechnen. Die ersten Entwicklungen von dynamischen Umlegungsmodellen in der Schweiz erfolgten in der Arbeit von Vrtic und Axhausen 2003. Einen Überblick zu dynamischen Umlegungsverfahren im MIV geben Friedrich und Vortisch, 2005. Für das nationale Personenverkehrsmodell 2010/2040 wurden dynamische MIV und ÖV-Modelle umgesetzt (Vrtic et al., 2016).

In Fröhlich et al. (2014) konnten Reaktionen auf geplante und ungeplante Anpassungen mit einer SP-Erhebung erfolgreich ermittelt werden. Bei der Modellierung von Mobility-Pricing-Szenarien wurden mit diesen Parametern die zeitnahen Verschiebungen auf die Gesamtnachfrage unter Berücksichtigung von flexiblen und nicht flexiblen Wegen mit 1h-Zeitscheiben umgesetzt (Sutter et al., 2019). Dabei wurde der Pivot Point Ansatz, vergleiche dazu Daly et al. (2005), verwendet.

International gibt es viele Studien zu Entscheidungsmodellen zur Wahl der Abfahrtszeit insbesondere im Arbeitspendlerverkehr. Dabei wurden Modelle mit Abhängigkeiten heimatgebundener und nicht heimatgebundener Wege geschätzt (z.B. Polak und Jones, 1994), oder flexible und nicht flexible Pendlerfahrten (Thorhauge et al., 2016). Insbesondere bei den jüngeren Arbeiten wurde mit sehr komplexen Entscheidungsmodellen, wie Mixed Logit, hybriden und Latent Class Ansätzen gearbeitet (Thorhauge et al. 2021, Ben-Akiva und Bierlaire, 2003).

Des Weiteren gibt es Ansätze, welche auf kontinuierlicher Abfahrtszeitwahl mit Entscheidungsmodellen basieren, wobei hier die diskreten Zeitscheiben überwunden werden (z.B. De Palma und Marchal, 2001).

Lamotte (2018) verwendet einen sowohl analytischen als auch theoretischen Ansatz, und zeigt den Einfluss der Präferenz der Abfahrtszeit auf das Gleichgewicht im Netz. Weiters untersucht er die geplanten zeitlichen Anpassungen (*scheduling preference*) bei langen Wegen. Lamotte schlägt zur Staureduktion eine Art Buchungssystem für Fahrten vor.

Die Literaturanalyse zeigt einerseits die Wichtigkeit der Wahl der Abfahrtszeit im Modellierungsprozess und andererseits viele methodisch unterschiedliche Ansätze. Im nachfolgenden Kapitel 1.3 wird darauf näher eingegangen.

1.3 Forschungsbedarf

Es besteht ein Forschungsbedarf, die Wahl der gewünschten Abfahrtszeit bei zeitnaher Verschiebung (*schedule approach*) in dynamischen Umlegungsmodellen mit feinen Zeitscheiben für den PW und ÖV zu integrieren, wobei für die Angebotsverhältnisse und Nachfrage zwischen den einzelnen feinen Zeitscheiben ein Gleichgewicht gefunden werden soll.

Die Beschränkung auf die Verkehrsmodi PW und ÖV erklärt sich mit der dominanten Stellung insbesondere bezüglich Verkehrsleistung der beiden Modi gegenüber dem Fussgänger- bzw. Veloverkehr. Makroskopische Modelle sind der «Stand der Technik» in der Verkehrsmodellierung und in der Schweiz als auch in den Nachbarländern ist das Softwareprodukt Visum 2024 der PTV Group aus Karlsruhe (Deutschland) die häufigste verwendete Software.

Die Bewertung der einzelnen Angebotelemente inkl. Anpassungszeit (Verschiebung) soll mit geschätzten Parametern aus bestehenden Studien unter Berücksichtigung zeitlich flexibler und nicht-flexibler Wege aus SP-Daten erfolgen. Die Angebotsverhältnisse je Zeitscheibe sollen zumindest:

- die MIV-Fahrzeit unter Belastung,
- MIV-Kosten inkl. tageszeitabhängige Kosten,
- ÖV-Beförderungszeit,
- Anzahl Umsteigen im ÖV,
- ÖV-Auslastung,
- ÖV-Kosten inkl. tageszeitabhängige Kosten und
- ÖV-Zugangs- und Abgangszeit

umfassen. Aufgrund der stark rechenintensiven Abläufe muss auf eine effiziente Programmierung besonders geachtet werden.

Ein weiterer Punkt ist die Testung und die Sammlung von Erfahrungen verschiedener dynamischer Umlegungsverfahren für den motorisierten Individualverkehr. Dabei handelt es sich um das dynamisch stochastische Verfahren, die dynamische Gleichgewichtsumlegung (DUE) und die simulationsbasierte dynamische Umlegung (SBA), alle von der PTV Group in Visum implementiert. Die SBA konnte aufgrund des Aufbaus der Strassenmodelle in der Schweiz (insbesondere Detaillierungsgrad der Knotenpunkte) und fehlender Softwarelizenzen nicht näher betrachtet werden. Im ÖV ist mit den fahrplanfeinen Umlegungsverfahren ein bewährtes Mittel sowohl bezüglich Verbindungswahl als auch Kenngrössenberechnung vorhanden.

2 Aufbau der dynamischen Verkehrsmodelle

Im Rahmen des Projektes mussten zunächst für den Analyse- bzw. Nullfall die bisher als Tagesmodelle mit statischen Umlegungsverfahren vorliegenden Verkehrsmodelle GVM Luzern 2017 (Vrtic et al, 2020a) und NPVM (Vrtic et al, 2020b) um die Nutzung eines dynamischen Umlegungsverfahrens und einer entsprechenden zeitscheibenfeinen Betrachtung der Verkehrsnachfrage erweitert werden. Die Dauer der betrachteten Zeitscheiben soll dabei jeweils 15 min umfassen, womit grundsätzlich 96 mögliche Zeitscheiben über einen Tag entstehen.

2.1 Erstellung viertelstundefeines GVM Luzern

Das GVM Luzern wurde für das Jahr 2017 entwickelt und beinhaltet ein MIV und ÖV-Modell mit den Zuständen DWV, DTV, MSP und ASP. Aufgrund der übersichtlichen Modellgrösse mit unter 1000 Zonen sind die Rechenzeiten gering. Insbesondere bei der Entwicklung neuer Verfahrensschritte ist dies ein grosser Vorteil.

2.1.1 Zeitscheibenfeine Matrizen

Für die Erstellung der viertelstundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen müssen in einem ersten Schritt die räumlichen und zeitlichen Variationen der Verkehrsnachfrage bestimmt werden. Durch die räumlichen Variationen werden die Unterschiede in der Verkehrsstärke einer Quelle-Ziel-Beziehung nach Richtungen innerhalb eines Zeitintervalls beschrieben. Da innerhalb eines viertelstündlichen Zeitintervalls die Verkehrsnachfrage einer Relation nach Richtungen sehr unterschiedlich sein kann, müssen beide Variationen simultan betrachtet werden. Diese Abhängigkeiten können am Beispiel der Pendlerströme gezeigt werden. In der Morgenspitze finden vor allem Verkehrsströme zu grossen oder mittleren Zentren statt, am Abend entsprechend in der Gegenrichtung. Ohne Berücksichtigung der räumlichen Charakteristiken der Zonen oder Nachfragesegmente könnten solche Gesetzmässigkeiten und Ableitungen der Richtungsstärke nur bedingt abgebildet werden.

Die Grundlage für die Abbildung der räumlichen Charakteristiken stellt die entsprechende Differenzierung der Nachfragesegmente bei der Erstellung der Quelle-Ziel-Matrizen dar. Somit sind die erstellten Verkehrsstrom-Matrizen nach Quelle-Ziel-Gruppe (QZG) aus dem Nachfragemodell DWV 2017 die wesentliche Grundlage für die Beschreibung der räumlichen Nachfragevariationen. In den QZG werden neben den Verhaltensähnlichkeiten auch die räumlichen Ähnlichkeiten (durch die Bildung von Produktions- und Attraktionsmerkmalen) berücksichtigt. So wird z.B. die räumliche Verteilung bei der QZG Wohnen-Arbeit (WA) durch die Erwerbstätigen als Produktionsgrösse und die Arbeitsplätze als Attraktionsgrösse bestimmt. Diese Ströme zeigen auch eine sehr ähnliche zeitliche Verteilung (Wohnen-Arbeit: Morgenspitze mit Ziel Arbeitsplatz, Arbeit-Wohnen: Abendspitze mit Ziel Wohnort).

Die 26 QZG des Binnenverkehrs aus dem Nachfragemodell wurden zunächst zu 10 QZG aggregiert, um Gruppen mit einer kleinen Stichprobe im MZMV 2015 und ähnlichem Verhalten zusammenzufassen. Tabelle 1 zeigt die Typisierung des Nachfragemodells und die Aggregation zu 10 aggregierten QZG (aggQZG).

Aggregation Quelle-Ziel-Gruppen (QZG)	
Quelle-Ziel-Gruppen	aggregierte Quelle-Ziel-Gruppen
WA (A)	WA
WA (SK)	WA
WBS	WB
WBU	WB
WEK	WE
WEL	WE
WN	WN
WBBH	WS
WFK	WS
WFL	WS
AW (A)	AW
AW (SK)	AW
BSW	BW
BUW	BW
EKW	EW
ELM	EW
NW	NW
BBHW	SW
FKW	SW
FLW	SW
AS	AW
SA	AW
A EkFk	AW
EkFk A	AW
EkFk EkFk	SW
SS	SW

Anmerkungen: W = Wohnen, A = Arbeit, B = Bildung, E = Einkauf, N = Nutzfahrt, S = Sonstige, k = kurz, l = lang;

Tabelle 1: Aggregation der 26 QZG im Binnenverkehr zu 10 aggregierten QZG

Berechnung von stundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen

Die im vorherigen Kapitel nach aggregierten QZG (aggQZG) berechneten viertelstündliche Nachfragevariationen während eines Werktages in der Deutschschweiz, die Verkehrsstrommatrizen nach QZG sowie die kalibrierten DWV-Matrizen ÖV und MIV stellen die Grundlage für die Generierung der viertelstundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen dar.

Der DWV-Aussenverkehr, welcher im Nachfragemodell nicht berechnet, sondern aus dem NPVM übernommen wurde, konnte mit der Belastungsvariation nach Richtung

von am Modellrand gelegenen Zählstellen mit Viertelstundenfaktoren aufgeteilt werden.

In Abbildung 2 ist der Ablauf für den Binnenverkehr dargestellt.

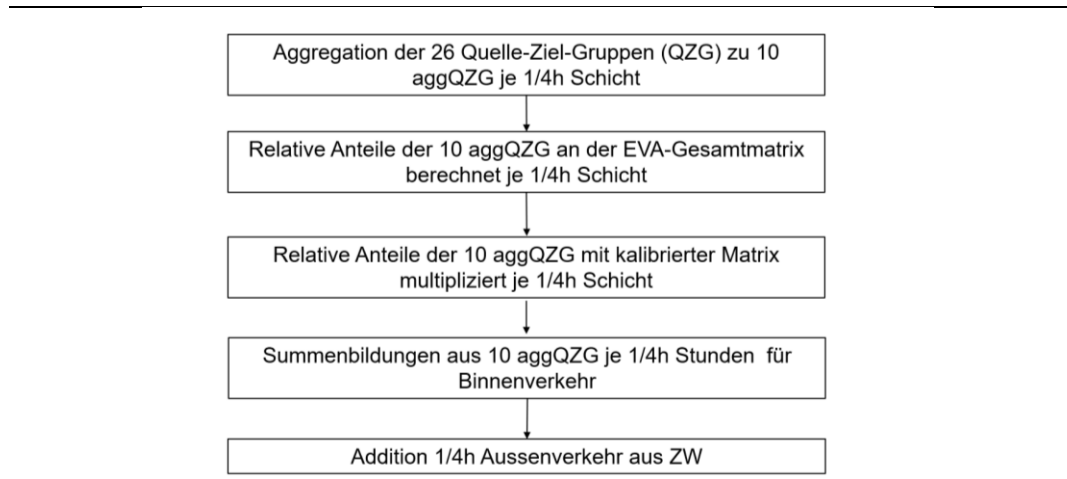


Abbildung 2: Ablaufschema zur Berechnung der viertelstundenfeinen Nachfragematrizen

2.1.2 Anpassungen Netze

Im Strassennetz des GVM Luzern wurden die stündlichen Strecken- und Abbiegekapazitäten geviertelt, um auf die Kapazität je Viertelstundenwert zu kommen.

Der Strassengüterverkehr wurde als Vorbelastung (Grundbelastung) auf das Netz attribuiert (VB_GV_15min). Dafür wurden die Streckenbelastungen der Lieferwagen (LI), Lastwagen (LW) und Lastzüge (LZ) der Morgenspitzenstunde 7-8 Uhr aufsummiert, wobei die LWs und Lastzüge Belastung mit dem Faktor zwei gewichtet wurde. Die Stundensumme wurde danach mit vier dividiert, um Viertelstundenwerte zu erhalten. Ebenso wurden die Abbiegekapazitäten der definierten Verkehrsknoten abgemindert.

Beim ÖV-Netz war durch die fahrplanfeine Definition nur eine Erweiterung bezüglich der ÖV-Kapazität notwendig. Um die ÖV-Auslastung berechnen zu können, wurde mit Hilfe des Verkehrsverbund Luzern (VVL) die Sitzplatz- und Gesamtkapazität der ÖV-Fahrzeuge zugewiesen. Dabei wurde von einer Maximalbelegung von 2 Personen pro m² ausgegangen.

2.1.3 Zähldaten

Von der SBB wurden für 33 Querschnitte viertelstundenfeine Zählwerte getrennt nach Richtung für Fern- und Regionalverkehr zur Verfügung gestellt. Diese wurden als Streckenattribut eingebaut. Dabei zeigt sich, dass die Attribuierung insbesondere im Fernverkehr dahingehend problematisch ist, dass der ganze Zuglauf zwischen zwei (Fernverkehrs) Haltestellen den Zählwert für die 1/4h-Zeitscheibe bekommt, obwohl der Fernverkehr Zug eine 1/2h oder eine Stunde Fahrzeit haben. Anders ausgedrückt, die 1/4h-Zählwerte fahren nicht mit dem Zug mit, sondern werden mit der Startabfahrtszeit auf den ganzen Streckenverlauf projiziert.

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Kennwerte aus der Umlegungsanalyse für den Fernverkehr und Regionalverkehr für die Zeitscheibe zwischen 7 und 8 Uhr angegeben.

Es zeigt sich, dass die Abweichungen (Modellbelastung versus Zählwerte) im Fernverkehr grösser als im Regionalverkehr sind.

Kennwerte ÖV-Umlegungsanalyse				
	Fernverkehr (FV)		Regionalverkehr (RV)	
Zeitscheibe	R2	Mittler rel. Fehler	R2	Mittler rel. Fehler
7.00-7.15	0,42	60%	0,45	45%
7.00-7.15	0,33	57%	0,41	51%
7.00-7.15	0,00	54%	0,45	48%
7.00-7.15	0,55	54%	0,54	53%

Tabelle 2: Kennwerte ÖV Umlegungsanalyse

Für den Strassenverkehr wurden vom ASTRA die stundenfeinen Zählwerte für 36 Querschnitte getrennt nach Richtung und Fahrzeugklasse nach SWISS10 zur Verfügung gestellt, dabei wurden die stündlichen Werte geviertelt, um Zählwerte für die 96 Viertelstundenzeitscheiben zu erhalten.

2.2 MIV-Umlegungsverfahren

Für die Berechnung einer dynamischen Umlegung wurden zunächst zwei entsprechende Umlegungsverfahren «Dynamische Gleichgewichtsumlegung» (DUE) und «Dynamisch-stochastische Umlegung» in PTV VISUM 2024 getestet. Die dritte Möglichkeit der «simulationsbasierten dynamischen Umlegung» (SBA) wurde aufgrund der notwendigen kompletten Neuattribuierung aller Knoten im Netz und der erwartbar langen Rechenzeit nicht geprüft.

Das Umlegungsverfahren «Dynamische Gleichgewichtsumlegung» (DUE) zeigt in den Tests im GVM Luzern bereits lange Rechenzeiten von >15h und in der Umlegungsanalyse stark abweichende zeitscheibenfeine Modellwerte im Vergleich zu den entsprechenden Zählwerten (mittlerer relativer Fehler > 50%). Die starken Abweichungen liegen vermutlich begründet im speziellen Streckenwiderstandsmodell des Verfahrens, welches umfangreiche Kalibrationsarbeiten benötigt, die im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht vorgenommen werden können. Ausserdem können in diesem Ansatz auch die im GVM Luzern bestehenden Anbindungsgewichte nicht berücksichtigt werden.

Das Verfahren «Dynamisch-stochastische Umlegung» zeigte in den Testrechnungen die vielversprechendsten Ergebnisse. Die Rechenzeiten liegen bei ca. 1h (3 Iterationen) und die Umlegungsanalyse mit zeitscheibenfeinen Zählwerten zeigt für einen unkalibrierten Zustand einen mittleren relativen Fehler von ca. 10%.

Problematisch zeigte sich in diesem Ansatz allerdings die Berücksichtigung einer zeitscheibenfeinen Maut als Widerstand in der Umlegung. Dies ist zwar laut der VISUM-Dokumentation «AssignmentMethods.xlsx» optional möglich, aber die vorgenommenen Testrechnungen und auch eine direkte Rücksprache mit VISUM-Entwicklern zu diesem dynamischen Umlegungsverfahren stellten klar, dass diese Funktionalität

nicht gegeben ist und in diesem Bereich seitens der PTV auch keine weitere Entwicklung geplant ist (Stand November 2023).

In diesem Zusammenhang wurde auch geklärt, dass eine Behandlung der Maut als Zusatz im Routenwiderstand als Lösung nicht zielführend ist. Hintergrund ist, dass der Routenwiderstand in der «Dynamisch-stochastischen Umlegung» generell als Fahrzeit betrachtet wird und somit ein Hinzufügen anderer signifikanter Grössen (wie z.B. einer Maut) die Wege zeitlich verlängert und diese damit fälschlicherweise bis in fernere Zeitscheiben reinreichen können.

Gewählter Ansatz

Folglich musste zur Berechnung einer dynamischen IV-Umlegung ein neuer Ansatz entwickelt werden. Der gewählte Ansatz sieht dabei die Verwendung einzelner zeitscheibenfeiner statischer IV-Umlegungen vor. Dazu müssen jeweils anteilig die vor- und nachlaufenden Wege aus anderen Zeitscheiben berücksichtigt werden, d.h. alle Wege, die in der jeweils betrachteten Zeitscheibe auf dem Netz unterwegs sind. Konkret umfasst dies alle Wege der vorherigen Zeitscheiben, die vor der betrachteten Zeitscheibe nicht beendet sind, sowie Wege innerhalb der betrachteten Zeitscheibe, die länger als das Zeitfenster dieser Zeitscheibe andauern.

Die Grundlagen für die Erstellung der Umlegungsmatrizen stellen demnach die auf Basis des Mikrozensus ermittelten oder auf Basis der Abfahrtszeitwahl berechneten zeitscheibenfeinen Nachfragematrizen dar, die anhand entsprechender Anteile in der jeweiligen zeitscheibenfeinen Umlegungsmatrix berücksichtigt werden.

In Abbildung 3 sind die Funktionsverläufe für die verwendete Aufteilung je nach Dauer des Weges und Abstands zur betrachteten Zeitscheibe dargestellt.

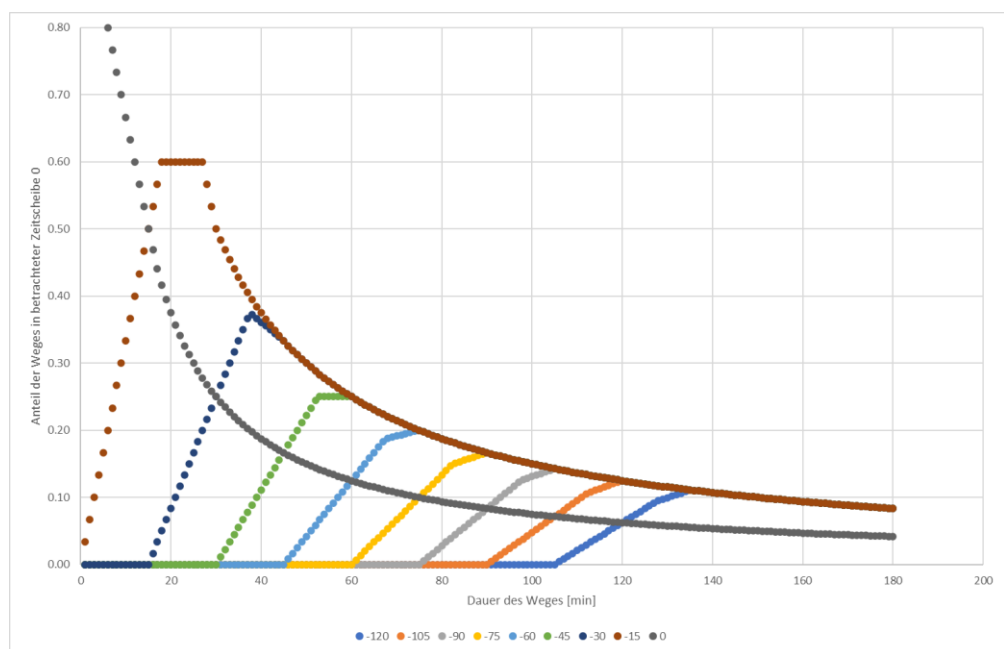


Abbildung 3: Vereinfachte Funktionsverläufe zur zeitscheibenfeinen Aufteilung der Nachfragematrizen auf Umlegungsmatrizen in Abhängigkeit der Dauer des Weges auf der Relation

Der Funktionsverlauf «0» zeigt speziell die Aufteilung für die jeweils betrachtete Zeitscheibe. Alle weiteren Funktionsverläufe zeigen die Aufteilung für die vorlaufenden Zeitscheiben (z.B. -15 min = Zeitscheibe, welche 15 min vor der betrachteten Zeitscheibe beginnt). Als Dauer des Weges wird im Modell T_{akt} verwendet, welche wiederum von der zeitscheibenfeinen Aufteilung der Nachfragematrizen auf die Umlegungsmatrizen abhängig ist. Die Aufteilung wird deshalb als eine Rückkopplungsrechnung bis zum Ausgleich von T_{akt} durchgeführt.

Die grundlegenden Funktionsverläufe für die Aufteilung wurden im Rahmen der Erstellung des NPVM entwickelt (Vrtic et al., 2016) und werden seither standardmässig in Verkehrsmodellen in der Schweiz angewandt. Im vorliegenden Projekt wurden sie für den Spezialfall einer viertelstündlichen Auflösung weiterentwickelt und berücksichtigen die Verteilung der einzelnen Abfahrten innerhalb der Zeitscheibe.

Die Aufteilung der Wege $Teilmatrix_{ij} = P_{ij}(T_{akt}) \cdot Nachfragematrix_{ij}$ erfolgt über die Berechnung der Anteile P der einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen in Abhängigkeit von deren Reisezeit T_{akt} (aus der vorangegangenen Iteration) und des Abstands zur betrachteten Zeitscheibe:

- Abfahrt in betrachteter Zeitscheibe
 - wenn $T_{akt} \leq 15$ min: $P = 1 - (T_{akt} / 30)$
 - wenn $T_{akt} > 15$ min: $P = 7.5 / T_{akt}$
- Abfahrt in vorheriger Zeitscheibe
 - wenn $T_{akt} \leq 15$ min: $P = T_{akt} / 30$
 - wenn $15 \text{ min} \leq T_{akt} \leq 30 \text{ min}$: $P = 3/5$
 - wenn $T_{akt} > 30$ min: $P = 15 / T_{akt}$
- Abfahrt früher:
 - wenn $T_{akt} \leq \text{Abstand Zeitscheibe} - 15$ min: $P = 0$
 - wenn $\text{Abstand Zeitscheibe} - 15 \text{ min} \leq T_{akt} \leq \text{Abstand Zeitscheibe} + 7.5$ min:
 $P = (T_{akt} - (\text{Abstand Zeitscheibe} - 15)) / (2 * \text{Abstand Zeitscheibe})$
 - wenn $T_{akt} > \text{Abstand Zeitscheibe} + 7.5$ min: $P = 15 / T_{akt}$

Zur Erstellung der Umlegungsmatrix einer betrachteten Zeitscheibe werden abschliessend die jeweiligen Teilmatrizen allesamt addiert.

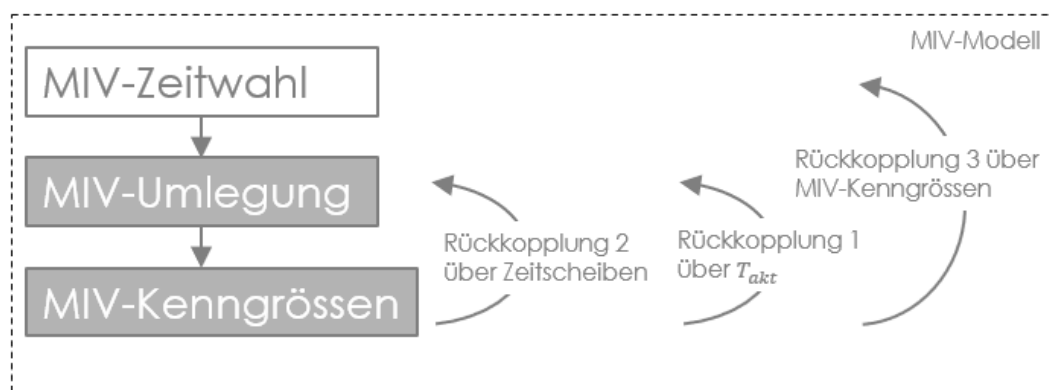


Abbildung 4: Ablaufschema des gesamten MIV-Modells mit Abfahrtszeitwahl (Schritte des neuen Ansatzes der dynamischen MIV-Umlegung in grau)

Der gesamte Ablauf des neuen Ansatzes (siehe auch Abbildung 4) gestaltet sich wie folgt:

Rückkopplung 1: Bis Ausgleich T_{akt} (Dauer des Weges).

Rückkopplung 2: Über alle betrachteten Zeitscheiben:

- Aufteilung der zeitscheibenfeinen Nachfragematrizen anhand der in Abbildung 3 dargestellten Funktionsverläufe in zeitscheibenfeine Umlegungsmatrizen, die die Vor- und Nachläufe berücksichtigen.
- Setzen einer ausgewählten zeitscheibenfeinen Umlegungsmatrix als Matrix des umzulegenden Nachfragesegments («PW_15min»).
- Berechnung einer Gleichgewichtsumlegung als statische IV-Umlegung auf Basis dieses Nachfragesegments («PW_15min») und Berechnung der entsprechenden IV-Kenngrössenmatrizen.
- Setzen der zeitscheibenfeinen IV-Kenngrössenmatrizen aus den IV-Kenngrössenmatrizen des umgelegten Nachfragesegments («PW_15min»).
- Aufteilung der zeitscheibenfeinen IV-Kenngrössenmatrizen anhand der in Abbildung 3 dargestellten Funktionsverläufe zurück auf zeitscheibenfeine IV-Kenngrössenmatrizen ohne berücksichtigte Vor- und Nachläufe.

Prüfung des Abbruchkriteriums auf Basis der zeitscheibenfeinen Nachfragematrizen.

Dabei wird innerhalb der Rückkopplung 1, die zum Ausgleich von T_{akt} durchgeführt wird, eine Rückkopplung 2 über alle betrachteten Zeitscheiben gerechnet. Innerhalb dieser Rückkopplung 2 werden die Verfahrensschritte zur Umlegungs- und Kenngrössenberechnung durchgeführt.

Als Abbruchkriterium der Rückkopplung 1 erfolgt eine Prüfung der relativen Änderung der mittleren Nachfrage über alle Relationen je betrachteter Zeitscheibe (siehe Formel (6) in Kapitel 3.2). Dabei wird die Nachfrage als Grösse herangezogen, um eine Vergleichbarkeit der Konvergenz mit dem ebenfalls auf der mittleren Nachfrage basierenden Abbruchkriterium des ÖV-Modells zu ermöglichen. Geschaltet wird das Abbruchkriterium in der VISUM-Funktion «Bedingter Rücksprung» über das binäre Netz-BDA «GG_Ausgleich_tAkt_Belastung». Die Rückkopplung 2 läuft so lange bis die Berechnungen für alle betrachteten Zeitscheiben durchgeführt wurden.

In Abbildung 5 sind die Verfahrensschritte des neuen Ansatzes zur Berechnung einer dynamischen IV-Umlegung in VISUM dargestellt. Dabei sind die zwei Rückkopplungen als bedingte Rücksprünge angelegt. Zudem ist erkennbar, dass die Berechnung der IV-Kenngrössenmatrizen einmal initial und jeweils innerhalb der Rückkopplungen für die einzelnen Zeitscheiben durchgeführt wird.

Initial werden zudem die Relationen in den Nachfragematrizen, die insgesamt über den Tag gesehen unter dem Grenzwert von 0.001 Fahrten liegen auf Null gesetzt. Dies erfolgt, um die Berechnungszeiten insbesondere im Hinblick auf Berechnungen in grösseren Modellen möglichst gering zu halten.

61	Verfahren	Bezugsobjekt(e)	Variante/Datei	Kommentar	Code
4	Gruppe KG Nullfall zeitscheiben	13 / 13		KG Nullfall zeitscheibenfen	
5	Skript ausführen			Nullfall NFM unter 0.001 auf Null setzen	
6	Umlegungsergebnisse löschen		IV		
7	IV-Kenngrößenmatrix berechnen	PW_15min PW_15min ...			
8	Skript ausführen			Setzen KGM t_akt und DIS Initial	
9	Skript ausführen			Berechnen zeitscheibenfeine NFM für Uml	
10	Skript ausführen			Setzen zeitscheibenfeine NFM für Uml	Nullfall: Keine gesetzt.
11	IV-Umlegung	PW_15min PW_15min ...	Gleichgewichtsumlegung		
12	IV-Kenngrößenmatrix berechnen	PW_15min PW_15min ...			
13	Skript ausführen			Setzen zeitscheibenfeine KGM aus Uml	
14	Bedingter Rücksprung	Verfahren 10	...	Iteration: Über alle Zeitscheiben	
15	Skript ausführen			Setzen zeitscheibenfeine KGM	
16	Skript ausführen			Berechnen Ausgleich t_akt in Belastung	
17	Bedingter Rücksprung	Verfahren 9	...	Iteration: Bis Ausgleich t_akt in Belastung	

Abbildung 5: Verfahrensablauf für dynamischen Ansatz auf Basis einzelner statischer IV-Umlegungen

In der rechten Spalte in Abbildung 5 ist das Attribut «Code» für die Verfahrensschritte dargestellt. Dabei findet sich für den Verfahrensschritt «Setzen zeitscheibenfeine NFM für Uml» hier der Eintrag «Nullfall: Keine gesetzt.». Über diesen Eintrag wird innerhalb der Rückkopplung 2 die Information über die jeweils betrachtete Zeitscheibe weitergegeben, d.h. der Eintrag ändert sich innerhalb der Rückkopplung automatisch jeweils auf die betrachtete Zeitscheibe «Nullfall: 06:00.», «Nullfall: 06:15.» etc. und sorgt dafür, dass die in den Verfahrensschritten «Setzen zeitscheibenfeine NFM für Uml» und «Setzen zeitscheibenfeine KGM aus Uml» hinterlegten Skripte je Iteration auf die gleiche Zeitscheibe zugreifen.

Abbildung 6 zeigt den Nachweis der Funktionalität des Ansatzes mit einer Umlegungsanalyse.

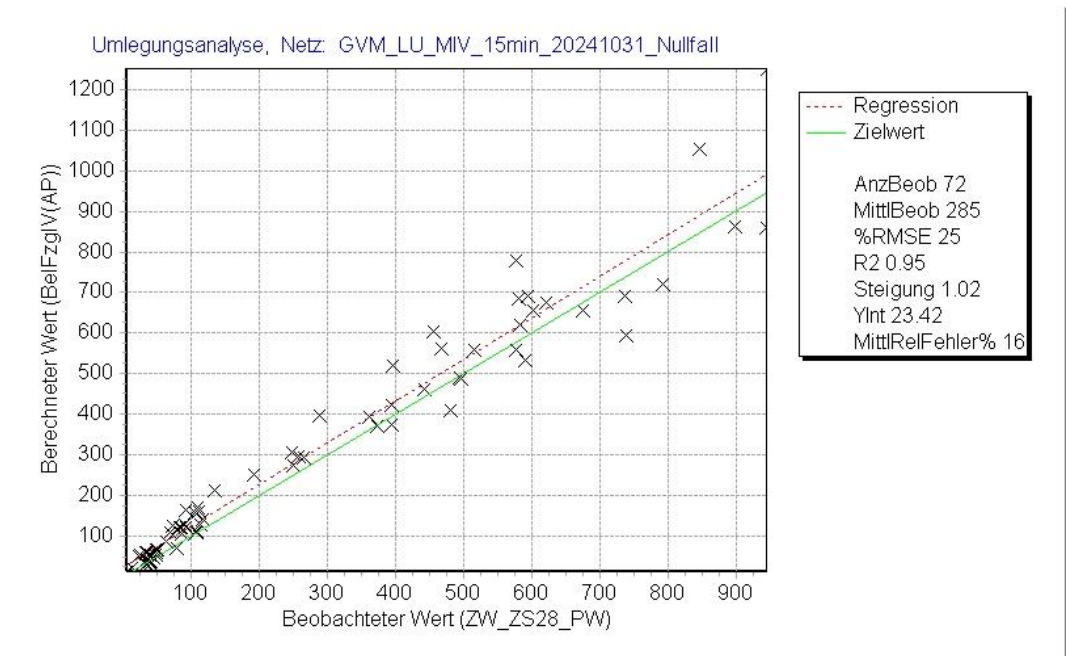


Abbildung 6: Umlegungsanalyse der Zeitscheibe von 7.00 bis 7.15 für den PW-Verkehr

2.3 ÖV-Verfahren

Für die Berechnung einer dynamischen Umlegung wird das fahrplanfeine ÖV-Umlegungsverfahren in PTV VISUM 2024 verwendet. Im Umlegungszeitraum wird der festzulegende Zeitraum an betrachteten Zeitscheiben (z.B. 6-9 Uhr, also 12 Zeitscheiben) inklusive eines ebenfalls festzulegenden zulässigen Verschiebungszeitraums ausserhalb dieses Zeitraums (z.B. +/- eine Stunde), identisch wie beim PW-Verkehr, eingestellt.

Ansatz

Wie im Fall des MIV-Modells, werden initial die Relationen in den Nachfragematrizen, die insgesamt über den Tag gesehen unter dem Grenzwert von 0.001 Fahrten liegen, auf Null gesetzt. Dies erfolgt, um die Berechnungszeiten insbesondere im Hinblick auf Berechnungen in grösseren Modellen möglichst gering zu halten.

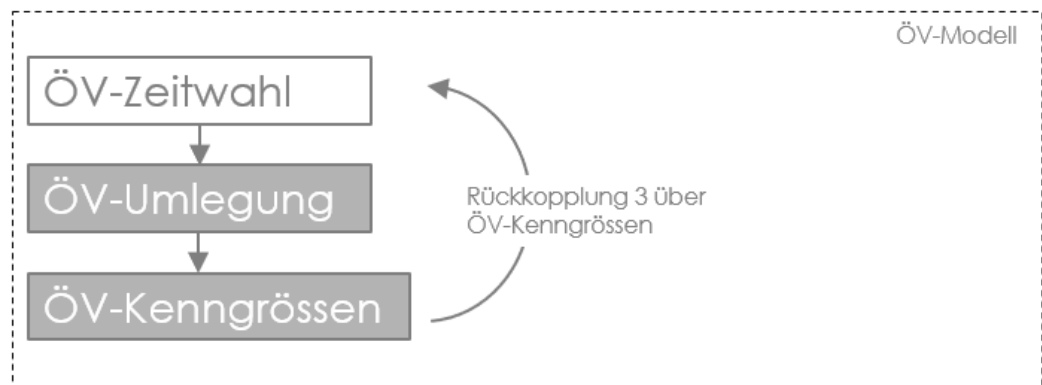


Abbildung 7: Ablaufschema des gesamten ÖV-Modells mit Abfahrtszeitwahl (Schritte der dynamischen ÖV-Umlegung in grau)

Der Ablauf des Ansatzes (siehe auch Abbildung 7) gestaltet sich wie folgt:

- Einstellung der Matrixganglinie für das betrachtete ÖV-Nachfragesegment
- Berechnung der Umlegung auf Basis des fahrplanfeinen ÖV-Umlegungsverfahrens
- Ermittlung der ÖV-Kenngrössen auf Basis des fahrplanfeinen ÖV-Umlegungsverfahrens

Zur Ermittlung der ÖV-Kenngrössen für jede einzelne Zeitscheibe wird in den Verfahrenseinstellungen des fahrplanfeinen ÖV-Umlegungsverfahrens die Berechnung der ÖV-Kenngrössen zusätzlich je Analysezeitintervall ausgewählt.

Die ÖV-Auslastung als zeitscheibenfeine Kenngrösse wird über die Teilweg-Kenngrösse (PLA) berechnet. Dazu wird zunächst in den allgemeinen Verfahrenseinstellungen die Optionen Wege als Verbindungen zu speichern, Belastungen zusätzlich für Fahrplanfahrten zu speichern und Wege-Belastungen je Nachfrageintervall zu speichern ausgewählt. Als Attribut für die Teilweg-Kenngrösse wird ein benutzerdefiniertes Formelattribut «Auslastung_Sitz_PerStd (AP)» auf ÖV-Teilwegebene erstellt, welches über die Aggregationsfunktion «DurchschnittAktive» auf Relationsebene aggregiert wird.

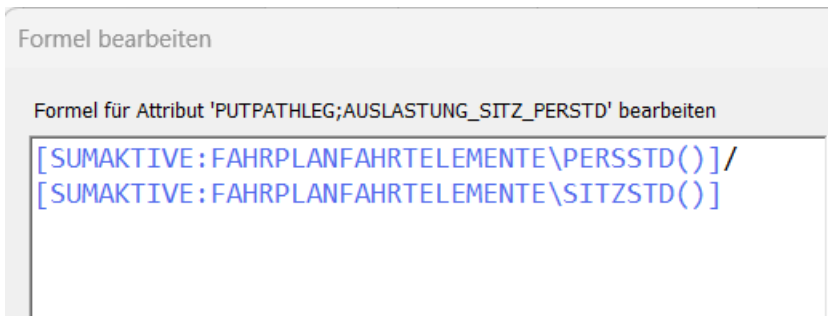


Abbildung 8: Formel des benutzerdefinierten Attributs «Auslastung_Sitz_PerStd (AP)»

Das Attribut «Auslastung_Sitz_PerStd (AP)» (siehe Abbildung 8) setzt sich dabei aus dem Quotienten der Summen von Personen- und Sitzplatzstunden über alle Fahrplanfahrt-Elemente des ÖV-Teilwegs zusammen. Dabei werden aufgrund eines möglicherweise bestehenden ÖV-Linienfilters (z.B. Fahrplan 2017 im GVM Luzern) nur aktive Elemente berücksichtigt.

3 Wahl der Abfahrtszeit

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde ein Verschiebungsmechanismus entwickelt, welcher vereinfacht die Wahl der Abfahrtszeit als zusätzlichen Modellschritt innerhalb eines vierstufigen, makroskopischen Verkehrsmodell abbilden soll.

3.1 Logit-Ansatz

Als modelltechnische Grundlage für den dafür notwendigen Verschiebungsmechanismus zwischen einzelnen Zeitscheiben wird ein multinomiales Logit-Modell (MNL) gewählt, in welchem eine Zeitscheibe jeweils einen deterministischen Nutzen aus beobachtbaren Eigenschaften (z.B. Betrag einer geltenden Maut) und variierende, stochastische Nutzen aus individuellen, wahrnehmungsabhängigen Eigenschaften (z.B. individuelle Wahrnehmung des Mautbetrages) zugewiesen bekommt. Der deterministische Nutzen V kann dabei als Funktion von Attributen modelliert werden, wohingegen der stochastische Nutzen ε indirekt durch die logistische Form des Wahlmodells als Gumbel-verteilte Grösse berücksichtigt wird. Die Auswahlwahrscheinlichkeit $P(i)$ einer Zeitscheibe i mit dem deterministischen Nutzen V_i berechnet sich dann wie folgt:

$$P(i) = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^J e^{V_j}} \quad (1)$$

wobei J die Anzahl aller als Alternativen verfügbaren Zeitscheiben darstellt.

Als Grundlage für die Berechnung des deterministischen Nutzens V einer Zeitscheibe wird im vorliegenden Projekt der gängige «Scheduling Model»-Ansatz von Small (1982) verwendet. Im Kern enthält dieser Ansatz die Annahme über eine «*Schedule disutility*» (negativer Nutzen aufgrund des Zeitplanes), die in Abhängigkeit der Abweichung von einer gewünschten Ankunfts- oder Abfahrtszeit als negativer Nutzen entsteht.

In Abbildung 9 ist schematisch ein möglicher, kontinuierlicher Verlauf dieser Grösse angezeigt, wobei im Ansatz und auch im Folgenden grundsätzlich mit drei diskreten Funktionsvariablen auf Basis der Zeitscheiben gearbeitet wird. Es wird unterschieden in einen «Scheduled delay» SD_{early} mit einer früheren Abfahrtszeit als die präferierte Abfahrtszeit (PAT) und SD_{late} mit einer späteren Abfahrtszeit sowie in eine Dummy-Variable $Dummy_{Verspaetung}$, die den bestrafenden Effekt einer Verspätung abbildet. Die Dummy-Variable $Dummy_{Verspaetung}$ wurde im vorliegenden Projekt als auch bei der SP-Schätzung nicht verwendet.

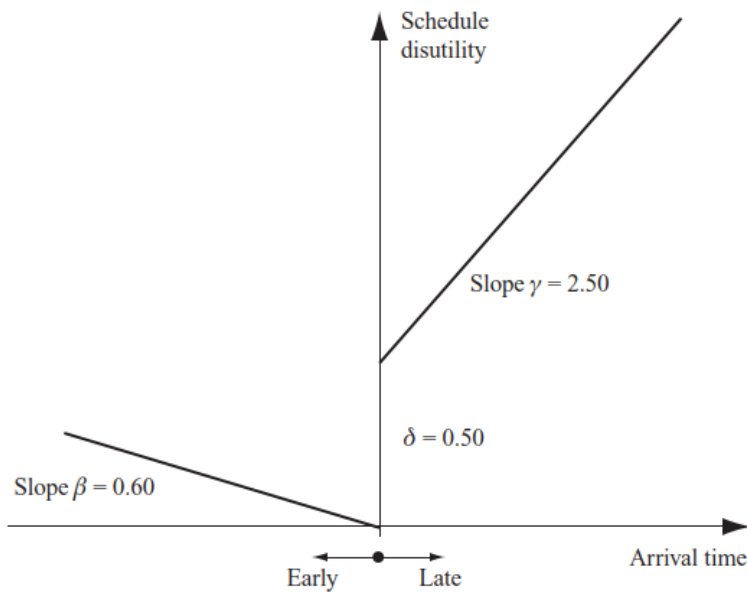


Abbildung 9: Schema der «Schedule disutility» für die Nutzenfunktion nach Small (1982) in Ortuzar und Willumsen (2011)

Die Nutzenfunktion für den deterministischen Teil orientiert sich damit an der von Small (1982) entwickelten Funktion und enthält neben den «Schedule disutility»-Variablen noch Variablen zur Abbildung der zeitscheibenabhängigen Fahrzeit T_{akt} und Kosten:

$$V = \beta_{T_{akt}} \cdot T_{akt} + \beta_{Kosten} \cdot Kosten + \beta \cdot SD_{early} + \gamma \cdot SD_{late} + \delta \cdot Dummy_{Verspaetung} \quad (2)$$

wobei

$$SD_{early} = \max\{-SD, 0\}$$

$$SD_{late} = \max\{SD, 0\}$$

$$SD = \text{scheduled delay} = \text{Abfahrtszeit} - \text{Präferierte Abfahrtszeit (PAT)}$$

Die letztlich im Projekt verwendete Nutzenfunktion und ihre entsprechenden Parameter wurden im Rahmen einer SP-Schätzung (ARE, 2024) auf Basis des MZMV 2021 spezifiziert und geschätzt (siehe dazu Kapitel 4).

3.2 Ablauf der Berechnung mit Korrekturmatrix

Die Berechnung der zeitscheibenfeinen Nachfrage M_i erfolgt auf der Basis zweier Wirkmechanismen. Zum einen berechnet das Logit-Modell eine zeitscheibenfeine Nachfrage auf Basis eines zeitscheibenfeinen Nutzens V_i , was bei einer Änderung dieses Nutzens zu einer Verschiebung der Nachfrage zwischen den Zeitscheiben führt. Es entsteht folgende «unkorrigierte» zeitscheibenfeine Nachfragematrix:

$$M_i^{unkorr} = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^J e^{V_j}} \cdot M \quad (3)$$

wobei

M = Nachfragematrix des gesamten betrachteten Zeitraums

Zum anderen wird die so berechnete zeitscheibenfeine Nachfrage noch über eine Korrekturmatrix angepasst. Erst danach ist die endgültige zeitscheibenfeine Nachfrage berechnet.

Die Korrekturmatrix wird als Differenz (bzw. Verhältnis) zwischen der mit dem Logit-Modell berechneten zeitscheibenfeinen Nachfragematrix und einer aus dem erhobenen Tagesgang des MZMV abgeleiteten, zeitscheibenfeinen Matrix gebildet. Dies erfolgt im Analyse- bzw. Nullfall. In der Korrekturmatrix stecken somit Nutzeninformationen, die bisher weder durch den deterministischen noch den darauf basierenden stochastischen Teil des bisher berücksichtigten Nutzens abgebildet werden.

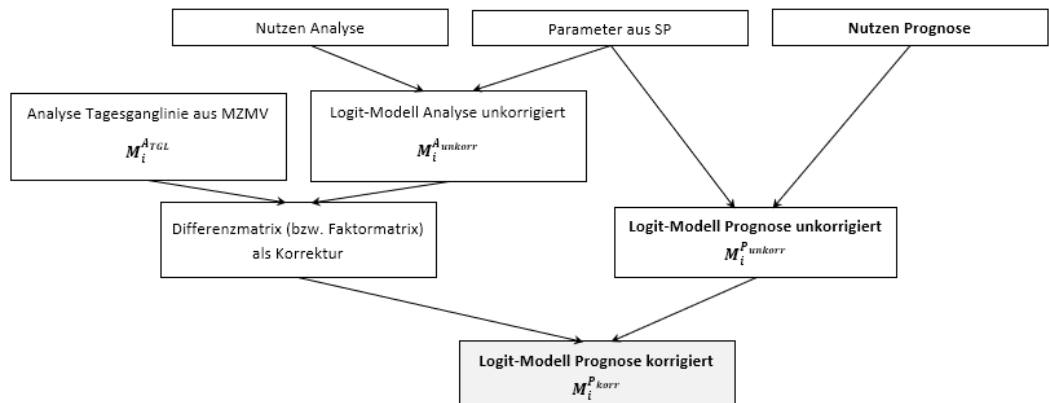


Abbildung 10: Schematischer Ablauf der Berechnung des Verschiebungsmechanismus

Im Prognose- bzw. Anwendungsfall werden die zeitscheibenfeinen Korrekturmatrizen dann als Differenzmatrix (bzw. Faktormatrix) auf die mit dem Logit-Modell für den Prognosenutzen berechneten zeitscheibenfeinen Nachfragematrizen aufsummiert (bzw. multipliziert).

Die generellen Zusammenhänge der verschiedenen Elemente des Verschiebungsmechanismus sind in Abbildung 10 dargestellt. Es entsteht folgende «korrigierte» zeitscheibenfeine Nachfragematrix (auf Basis der Differenz bzw. des Verhältnisses):

$$M_i^{P_{korr}} = M_i^{P_{unkorr}} + (M_i^{ATGL} - M_i^{A_{unkorr}}) \text{ bzw.} \tag{4}$$

$$M_i^{P_{korr}} = M_i^{P_{unkorr}} \cdot \left(\frac{M_i^{ATGL}}{M_i^{A_{unkorr}}} \right)$$

wobei M_i^{ATGL} = Nachfragematrix aus dem erhobenen Tagesganglinie des MZMV

In den späteren Testszenarien wird standardmässig eine Verrechnung der Korrekturmatrizen mit Wirkanteilen von 50/50 zwischen Differenz- und Verhältnismatrizen festgelegt.

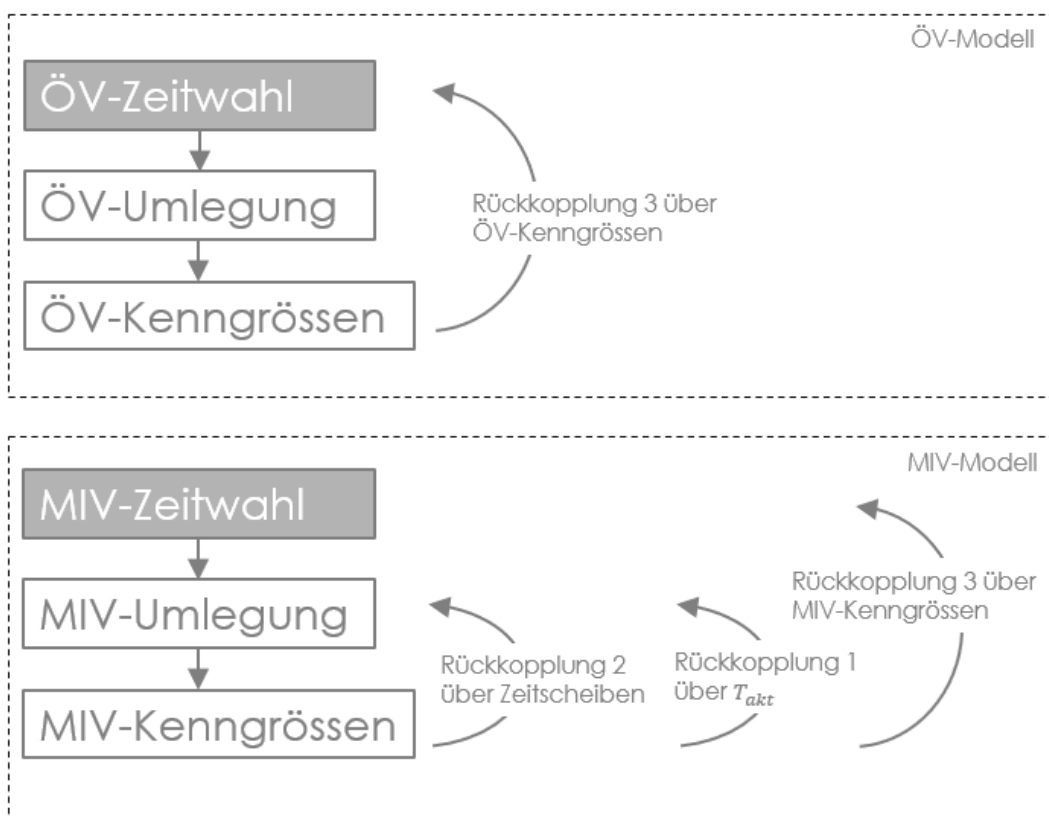


Abbildung 11: Abfahrtszeitwahl (in Grau) im Ablaufschema des gesamten MIV- bzw. ÖV-Modells

Zudem erfolgt im Prognose- bzw. Anwendungsfall eine Rückkopplung 3 (siehe Abbildung 11) für die Abfahrtszeitwahl über MIV- bzw. ÖV-Kenngrössen wie T_{akt} oder die ÖV-Auslastung. Damit wird beispielsweise der Nutzen $V(T_{akt})$ in der Abfahrtszeitwahl iterativ ausgeglichen.

Als Abbruchkriterium der Rückkopplung 3 erfolgt je Iteration jeweils im MIV- und ÖV-Modell die Berechnung der relativen Änderung der mittleren Nachfrage über alle Relationen je betrachteter Zeitscheibe i (siehe Formel (6)).

$$Relative\ Abweichung_i = \frac{Mittelwert(|M_{1,i} - M_{-1,i}|)}{Mittelwert(M_{-1,i})} \cdot 100 \tag{5}$$

wobei

$$M_{1,i} =$$

Umlegungsmatrix der aktuellen Iteration für Zeitscheibe i .

$$M_{-1,i} =$$

Vergleichsmatrix der vorherigen Iteration für Zeitscheibe i .

In den Testszenerarien wurde eine zulässige relative Abweichung von 1% angenommen. Wie im Fall der Rückkopplung 1 wird die Nachfrage als Grösse herangezogen, um eine Vergleichbarkeit der Abbruchkriterien zwischen MIV- und ÖV-Modell zu ermöglichen.

4 SP-Schätzung

Das Projekt ARE (2024) analysiert mit einer Stated Preference (SP) Befragung angehängt an den MZMV, 2021, das Entscheidungsverhalten der Schweizer Bevölkerung hinsichtlich Modus-, Routen- und Abfahrtszeitwahl mit Hilfe von diskreten Entscheidungsmodellen. Dabei wurde auch die möglichen Auswirkungen von der Covid-19 Pandemie auf das Verkehrsverhalten sowie der Vergleich der Modellresultate mit den Resultaten der SP-Umfrage 2015 aufgezeigt. Es werden Ergebnisse zu wichtigen Indikatoren wie dem Zeitwert (Value of Travel Time Savings, VTTS) und Elastizitäten publiziert und deren langfristige Gültigkeit diskutiert.

Für den entwickelten Verschiebungsmechanismus zur Abbildung der Abfahrtszeitwahl wird auf Basis der SP-Befragung die Spezifizierung des Nutzens und eine entsprechende Parameterschätzung vorgenommen. Dabei wird jeweils eine Nutzenfunktion für den MIV und den ÖV spezifiziert. Geschätzt werden verschiedene Parametersätze auf Basis unterschiedlicher Elastizitätsbedingungen und Fahrtzwecke.

Zur Wahrung der Kompaktheit des Ansatzes wird auf die Verwendung differenzierter Nutzenfunktion für Zwecke mit flexiblen (z.B. Freizeit) und nicht-flexiblen Abfahrtszeiten (z.B. Arbeit) verzichtet. Der bei nicht-flexiblen Abfahrtszeiten stärkere negative Nutzen einer Abweichung von der bisherigen Abfahrtszeit ist implizit in den Parametern («all purpose») berücksichtigt.

In Formel (6) ist die verwendete MIV-Nutzenfunktion für eine Abfahrtszeitalternative A ausgehend von einer bisherigen Abfahrtszeit dargestellt.

$$V_{PW_A} = \left(\frac{kg_{t_{akt}}}{60}\right) \cdot PAR_{t_{akt}} * \left(\frac{kg_{dis}}{20}\right)^{PAR_{DIS_{t_{akt}}}} + kg_{Maut} \cdot PAR_{KOSTEN} \quad (6)$$

$$\cdot \left(\frac{kg_{dis}}{20}\right)^{PAR_{DIS_{KOSTEN}}} + SD_{early} \cdot PAR_{SD_{early}} + SD_{late} \cdot PAR_{SD_{late}}$$

wobei

$PAR_{t_{akt}}, PAR_{KOSTEN}, PAR_{SD_{early}}, PAR_{SD_{late}}$
 $PAR_{DIS_{t_{akt}}}, PAR_{DIS_{KOSTEN}}$

Parameter, geschätzt auf Basis MZMV.
 Distanz-Elastizität für Zeit- und Kostenparametern, geschätzt auf Basis MZMV.

$$\frac{kg_{dis}}{20} =$$

Distanzverhältnis als Kenngrösse PW-Distanz geteilt durch 20 km (durchschnittliche PW-Distanz im MZMV).

$$kg_{t_{akt}} =$$

Fahrzeit unter Belastung in Minuten.

$$kg_{Maut} =$$

Kenngrösse Maut in CHF.

$$SD_{early}, SD_{late} =$$

Absolute Abweichung der Abfahrtszeit der betrachteten Alternative A von der bisherigen Abfahrtszeit in Stunden.

Aus den verschiedenen Schätzungen wurde das Modell mit dem höchsten Erklärungswert gewählt, dessen Parameter in Tabelle 3 wiedergegeben sind:

Parameter MIV-Nutzenfunktion		
Parameter	=	Wert
$PAR_{t_{akt}}$	=	-4,80
PAR_{KOSTEN}	=	-0,1872
$PAR_{SD_{early}}$	=	-1.82
$PAR_{SD_{late}}$	=	-1.63
$PAR_{DIS_{KOSTEN}}$	=	-0.3852
$PAR_{DIS_{t_{akt}}}$	=	-0,3792

Tabelle 3: Gewählte Parameter der MIV-Nutzenfunktion

4.1 ÖV-Nutzenfunktion

In Formel (9) ist die verwendete ÖV-Nutzenfunktion für eine Abfahrtszeitalternative A ausgehend von einer bisherigen Abfahrtszeit dargestellt. Die Terme zur Berechnung des Nutzens der ÖV-Fahrzeit und der ÖV-Kosten sind explizit in den Formeln (7) und (8) aufgeführt.

$$V_{\text{ÖV}_{A_{Zeit}}} = \left(\left(\frac{kg_{RITA}}{60} \right) + PAR_{AUSL_{LEV2}} \cdot \left(\frac{kg_{RITA}}{60} \right) \cdot Dummy_{PLA_{LEV2}} + PAR_{AUSL_{LEV3}} \cdot \left(\frac{kg_{RITA}}{60} \right) \cdot Dummy_{PLA_{LEV3}} + PAR_{AUSL_{LEV4}} \cdot \left(\frac{kg_{RITA}}{60} \right) \cdot Dummy_{PLA_{LEV4}} + kg_{NTR} \cdot PAR_{UMSTIEG} \right) \cdot PAR_{RITA} \cdot \left(\frac{kg_{RID}}{20} \right)^{PAR_{DIS_{RITA}}} \quad (7)$$

$$V_{\text{ÖV}_{AKosten}} = kg_{FAR} \cdot PAR_{KOSTEN} \cdot \left(\frac{kg_{RID}}{20} \right)^{PAR_{DIS_{KOSTEN}}} \quad (8)$$

$$V_{\text{ÖV}_A} = V_{\text{ÖV}_{A_{Zeit}}} + V_{\text{ÖV}_{AKosten}} + SD_{early} * PAR_{SD_{early}} + SD_{late} * PAR_{SD_{late}} \quad (9)$$

wobei

$PAR_{RITA}, PAR_{KOSTEN}, PAR_{SD_{early}}, PAR_{SD_{late}}$

$PAR_{DIS_{RITA}}, PAR_{DIS_{KOSTEN}}$

$PAR_{UMSTIEG}$

$PAR_{AUSL_{LEV2...4}}$

Parameter

Distanz-Elastizität für Zeit- und Kostenparameter

Parameter für Umsteigevorgänge

Zusätzlicher Bestrafungsfaktor für jede Reisestunde in höheren Auslastungslevel 2, 3 oder 4 (LEV2 = mittel, LEV3 = hoch, LEV4 = übersättigt), geschätzt auf Basis MZMV. (LEV1 ist als Null gesetzt.)

$Dummy_{PLALEV2...4} =$	Dummy-Variable (=1, wenn Kenngrösse Auslastung kg_{PLA} im jeweiligen Auslastungslevel $Ausl_{LEV2..4}$).
$\frac{kg_{RID}}{20} =$	Distanzverhältnis als Kenngrösse ÖV-Distanz geteilt durch 20 km (durchschnittliche ÖV-Distanz im MZMV).
$kg_{RITA} =$	Kenngrösse ÖV-Beförderungszeit in Minuten.
$kg_{FAR} =$	Kenngrösse ÖV-Kosten in CHF.
$kg_{NTR} =$	Kenngrösse Umsteigevorgänge.
$SD_{early}, SD_{late} =$	Absolute Abweichung der Abfahrtszeit der betrachteten Alternative A von der bisherigen Abfahrtszeit in Stunden.

Aus den verschiedenen Schätzungen wurde das Modell mit dem höchsten Erklärungs- wert gewählt, dessen Parameter in Tabelle 4 wiedergegeben sind:

Parameter ÖV-Nutzenfunktion

Parameter	Wert
$PAR_{RITA} =$	-1,869
$PAR_{KOSTEN} =$	-0,1391
$PAR_{SD_{early}} =$	-1,923
$PAR_{SD_{late}} =$	-1,375
$PAR_{UMSTIEG} =$	0,1449
$PAR_{AUSL_{LEV2}} =$	0,1482
$PAR_{AUSL_{LEV3}} =$	0,3134
$PAR_{AUSL_{LEV4}} =$	0,7995
$PAR_{DISKOSTEN} =$	-0,7100
$PAR_{DISRITA} =$	0

Tabelle 4: Gewählte Parameter der ÖV-Nutzenfunktion

Als Untergrenze für die jeweiligen Auslastungslevel ($Ausl_{LEV2}$ = mittel, $Ausl_{LEV3}$ = hoch, $Ausl_{LEV4}$ = übersättigt) werden jeweils folgende Werte eingesetzt:

$$MinAusl_{LEV2} = 0.50$$

$$MinAusl_{LEV3} = 0.75$$

$$MinAusl_{LEV4} = 1.00$$

Für $Ausl_{LEV2}$ bedeutet dies z.B. eine zulässige Kenngrösse Auslastung kg_{PLA} zwischen $>=0.5$ und <0.75 .

5 Analysemodell mit Wahl der Abfahrtszeit

Im vorliegenden Projekt wurde beispielhaft für das GVM Luzern ein vollständiges Analysemodell (Ziel-, Modus- und Routenwahl) mit einer Wahl der Abfahrtszeit und einem dynamischen Umlegungsverfahren aufgebaut. Gleichzeitig wurden in den jeweiligen NPVM-Umlegungsversionen reine Abfahrtszeit- und Routenwahlmodelle mit einem dynamischen Umlegungsverfahren für PW und ÖV erstellt.

5.1 MIV-Modell

Im MIV-Umlegungsmodell des GVM Luzern müssen zur Abbildung der Wahl der Abfahrtszeit und zur Integration des dynamischen Umlegungsverfahrens die in folgenden Aspekten angepasst werden. Grundsätzlich sind diese Anpassungen auch weitestgehend deckungsgleich in das MIV-Modell des NPVM übernommen worden, wobei auf vereinzelte Abweichungen im Folgenden speziell eingegangen wird.

5.1.1 MIV-Modell allgemein

5.1.1.1 PW-Verfahrensablauf

Zentrale Änderung ist die Integration eines neuen Verfahrensablaufes mit Berechnung der Abfahrtszeitwahl auf Basis des in Kapitel 3 beschriebenen Verschiebungsmechanismus und einer dynamischen Umlegung auf Basis des in Kapitel 1 beschriebenen Ansatzes sowie entsprechender Rückkopplungen und Verrechnungen.

Verfahren
▼ Gruppe ::: NULLFALL
▶ Gruppe KG Nullfall zeitscheibenfein ...
▶ Gruppe Nachfrage Nullfall (= Fakt./Diff.-Matrix) ...
▶ Gruppe KG Nullfall 24h (DWV) ...
▶ Gruppe Speichern KGM 24h (DWV) ...
▼ Gruppe ::: ANWENDUNGSFALL
▶ Gruppe Einlesen Nachfrage 24h (DWV) ...
▶ Gruppe PW: Hochrechnung Nachfrage 24h (DWV) ...
▶ Gruppe Erstellung Matrixganglinie ...
▶ Gruppe Nachfrage Anwendungsfall (+ Fakt./Diff.-Matrix) ...
▶ Gruppe KG Anwendungsfall zeitscheibenfein ...
▶ Gruppe Iteration: Bis Ausgleich t_{akt} in Nachfrage ...
▶ Gruppe KG Anwendungsfall 24h (DWV) ...
▶ Gruppe Speichern KGM 24h (DWV) ...

Abbildung 12: Übersicht Verfahrensgruppen im MIV-Modell

Der Verfahrensablauf (siehe Abbildung 12) teilt sich auf in einen ersten Abschnitt mit Verfahrensschritten für die Berechnung des Analyse- bzw. Nullfalls (siehe Kapitel

5.1.2) und einen zweiten Abschnitt für die Berechnung des Prognose- bzw. Anwendungsfalls (siehe Kapitel 5.1.3).

5.1.1.2 PW-Matrizen

Im Gegensatz zum bestehenden tagesfeinen Modell müssen die Matrizen für Nachfrage- und Kenngrößen zeitscheibenfein angelegt werden. Dabei sind für folgende Größen jeweils 96 Matrizen für alle 15min-Zeitscheiben über den Tag zu erstellen:

- Nachfragematrizen des Analyse- bzw. Nullfalls
 - «PW_NFM_ ... _Ana» Matrixganglinie M_i^{ATGL} aus MZMV
 - «PW_NFM_ ... _Ana_unkorrigiert» Unkorrigierte Matrizen aus Abfahrtszeitwahl $M_i^{Aunkorr}$
 - «PW_NFM_ ... _Ana_Differenz» Korrekturmatrizen $M_i^{ATGL} - M_i^{Aunkorr}$
 - «PW_NFM_ ... _Ana_Verhaeltnis» Korrekturmatrizen $\frac{M_i^{ATGL}}{M_i^{Aunkorr}}$
 - «PW_NFM_ ... _Ana_Uml» Umlegungsmatrizen (inkl. vor- und nachlaufender Wege)

- Nachfragematrizen des Prognose- bzw. Anwendungsfalls
 - «PW_NFM_ ... _Prog» Ergebnismatrixganglinie M_i^{PTGL}
 - «PW_NFM_ ... _Prog_unkorrigiert» Unkorrigierte Matrizen aus Abfahrtszeitwahl $M_i^{Punkorr}$
 - «PW_NFM_ ... _Prog_Uml» Umlegungsmatrizen (inkl. vor- und nachlaufender Wege)

- Kenngrößenmatrizen
 - «PW_KGM_ ... _TTC» Ergebniskenngrösse T_{akt} (inkl. vor- und nachlaufender Wege)
 - «PW_KGM_ ... _TTC_Uml» Kenngrösse T_{akt} auf Basis der Umlegungsmatrizen
 - «PW_KGM_ ... _MAUT» Ergebniskenngrösse Maut (inkl. vor- und nachlaufender Wege)
 - «PW_KGM_ ... _MAUT_Uml» Kenngrösse Maut auf Basis der Umlegungsmatrizen
 - «PW_KGM_ ... _DIS» Ergebniskenngrösse Distanz (inkl. vor- und nachlaufender Wege)
 - «PW_KGM_ ... _DIS_Uml» Kenngrösse Distanz auf Basis der Umlegungsmatrizen

- Hilfsmatrizen für Rückkopplung und Abbruchkriterien
 - «PW_NFM_ ... _Iter-1_Belastung» Vergleichsmatrix Iteration-1 für Abbruchkriterium Rückkopplung 1
 - «PW_NFM_ ... _Iter-1_Nachfrage» Vergleichsmatrix Iteration-1 für Abbruchkriterium Rückkopplung 3
 - «PW_KGM_ ... _TTC_Iter-1_Belastung» Kenngrösse T_{akt} Iteration-1 in Rückkopplung 1 für Aufteilung vor- und nachlaufender Wege
 - «PW_KGM_ ... _TTC_Iter-1_Nachfrage» Optional: Kenngrösse T_{akt} Iteration-1 in Rückkopplung 3

Die Kenngrößen- und Hilfsmatrizen werden dabei sowohl im Analyse- bzw. Nullfall als auch im Prognose- bzw. Anwendungsfall verwendet, d.h. sie werden im Ablauf entsprechend überschrieben.

Ferner sind speziell für den Berechnungsablauf folgende einzelne Matrizen angelegt:

«PW_NFM_24h_Ana»	DWV-Nachfrage aus MZMV (Analyse- bzw. Nullfall)
«PW_NFM_EVA_24h_Ana»	EVA-Nachfrage (DWV) des Analyse- bzw. Nullfalls
«PW_NFM_EVA_24h_Prog»	EVA-Nachfrage (DWV) des Prognose- bzw. Anwendungsfalls
«PW_NFM_24h_Prog_Absolut»	Korrekturmatrix (Differenz) für Hochrechnung EVA-Nachfrage auf DWV-Nachfrage im Prognose- bzw. Anwendungsfalls
«PW_NFM_24h_Prog_Relativ»	Optional: Korrekturmatrix (Verhältnis) für Hochrechnung EVA-Nachfrage auf DWV-Nachfrage im Prognose- bzw. Anwendungsfalls
«PW_NFM_24h_Prog»	DWV-Nachfrage des Prognose- bzw. Anwendungsfalls
«PW_NFM_XXh_Prog»	DWV-Nachfrage des betrachteten Zeitraums (Prognose- bzw. Anwendungsfall) mit XXh von 01h bis max. 24h
«Schalter Aussenverkehr»	Schaltermatrix für die Übernahme der Aussenverkehre des Analyse- bzw. Nullfall in den Prognose- bzw. Anwendungsfall
«DIS_Init»	Initiale PW-Kenngrösse Distanz
«PW_15min»	Umlegungsmatrix des PW-Nachfragesegments, die je Zeitscheibe neu gesetzt und in der Gleichgewichtsumlegung verwendet wird.
«TTC_24h»	PW-Kenngrösse T_{akt} für den DWV (Übernahme in das Nachfragemodell)
«MAUT_24h»	PW-Kenngrösse Maut für den DWV (Übernahme in das Nachfragemodell)
«DIS_24h»	PW-Kenngrösse Distanz für den DWV (Übernahme in das Nachfragemodell)

5.1.1.3 PW-Nachfragesegmente und -Nachfragedaten

Im Zuge der Erweiterung wird ein neues Nachfragesegment «PW_15min» erstellt, welchem in den Nachfragedaten die Umlegungsmatrix «PW_15min» zugeordnet wird. Im

entwickelten dynamischen Umlegungsansatz beinhaltet diese Matrix jeweils die zeitscheibenfeine Nachfrage, die mit der statischen Gleichgewichtsumlegung jeweils einzeln umgelegt wird. Sie wird demnach in jedem Rückkopplungsschritt mit der Nachfrage der betrachteten Zeitscheibe überschrieben.

5.1.1.4 Allgemeine MIV-Verfahrenseinstellungen

Der Hochrechnungsfaktor C der einzelnen CR-Funktionen wird für Strecken und Abbieger auf 1 gesetzt und der Strassengüterverkehr als zeitscheibenfeine Vorbelastung integriert (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: Integration des Strassengüterverkehrs als Vorbelastung über ein Strecken-BDA

Die PW-Routenwiderstandsfunktion berücksichtigt die Fahrzeit unter Belastung (T_{akt}) und die Maut PW. Die Umrechnung der monetären Mautbeträge zu Fahrzeit erfolgt mit einem Zeitwert von CHF 20/h. (siehe Abbildung 14).

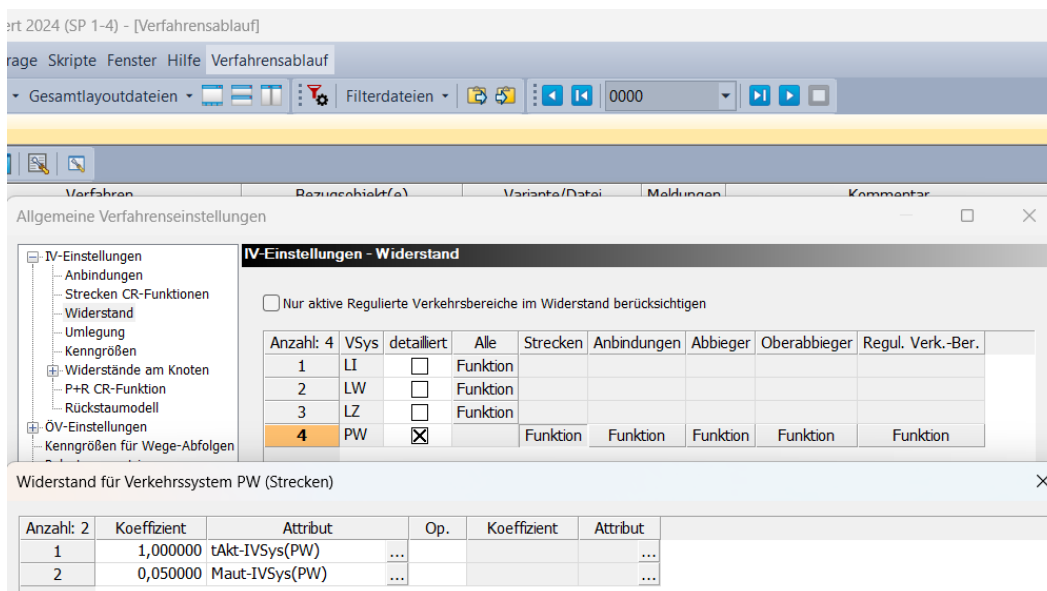


Abbildung 14: PW-Routenwiderstandsfunktion

5.1.1.5 Benutzerdefinierte Attribute (BDA)

Die Vorbelastung des Strassengüterverkehrs ist im Strecken-BDA «VB_GV_15min» hinterlegt. Als Abbruchschalter auf Basis der Abbruchkriterien für die Rückkopplung

1 und Rückkopplung 3 wird jeweils ein Netz-BDA «GG_Ausgleich_tAkt_Belastung» und «GG_Ausgleich_tAkt_Nachfrage» ergänzt.

5.1.1.6 MIV-Netzmodell

Die Streckenkapazitäten werden im MIV-Netzmodell von Stundenwerten auf 15min-Werte heruntergebrochen. Dabei erfolgt eine einfache Vierteilung der bestehenden Stundenwerte.

5.1.2 MIV-Nullfall

5.1.2.1 PW-Nachfragegrundlagen

Als Grundlage für die Berechnung des Nullfalls und damit der Korrekturmatrizen für Anwendungsfälle wird eine zeitscheibenfeine Matrixganglinie für 15min-Zeitscheiben aus dem MZMV verwendet. Im GVM Luzern liegen hier alle 96 15min-Zeitscheiben über den Tag vor, welche aufaddiert die Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Ana» ergeben. Im NPVM sind hier u.a. zur Reduzierung der Dateigrösse nur alle 15min-Zeitscheiben für den betrachteten Zeitraum inklusive einer zulässigen Verschiebung der Abfahrtszeit vor einer Stunde (05:00-10:00 Uhr, siehe Kapitel 6) vorhanden.

5.1.2.2 Spezielle PW-Verfahrensschritte

Für die Berechnung des Nullfalls werden neben den Verfahrensschritten zur Berechnung der dynamischen Umlegung und der Korrekturmatrizen der Abfahrtszeitwahl (Verschiebungsmechanismus) noch weitere begleitende Verfahrensschritte ausgeführt.

Zum einen erfolgt vor Berechnung von Umlegung und der Korrekturmatrizen eine Rundung der zeitscheibenfeinen Matrixganglinie aus dem MZMV auf die zehnte Nachkommastelle sowie das Setzen von Matrixwerten in der Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Ana» unter einem festgelegten Grenzwert auf Null. Dies erfolgt aus Gründen der Rechenzeiteinsparung, da Relationen mit vernachlässigbarer Nachfrage damit in der Umlegung nicht berücksichtigt werden müssen.

Die Rundung bzw. Null-Setzung der Werte unter einem festgelegten Grenzwert in der Matrixganglinie des GVM Luzern erfolgt inklusive der Symmetrisierung der Gesamtmatrix über den Tag «PW_NFM_24h_Ana». Im NPVM erfolgen diese Verfahrensschritte ohne Symmetrisierung, da die Matrixganglinie hier nicht über den ganzen Tag betrachtet wird.

Die angepasste Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Ana» wird anschliessend anhand der Tagesganganteile aus MZMV wieder auf die zeitscheibenfeine Nachfragematrixganglinie heruntergebrochen.

Als Abbruchkriterium der Rückkopplung 1 sind in der Gruppe «Iteration: Bis Ausgleich T_{akt} in Belastung» zwei Verfahrensschritte angelegt. Zunächst erfolgt die Berechnung der relativen Änderung der mittleren Nachfrage über alle Relationen je betrachteter Zeitscheibe. Anschliessend wird über die VISUM-Funktion «Bedingter Rücksprung» die Rückkopplung eingeleitet oder die Konvergenz festgestellt. Die Funktion wird dabei über ein binäres Netz-BDA «GG_Ausgleich_tAkt_Belastung» geschaltet, welches auslöst, falls die relative Änderung der mittleren Nachfrage über alle Relationen je betrachteter Zeitscheibe unter einem festgelegten Grenzwert liegt.

Nach der Berechnung von Umlegung und Korrekturmatrizen findet im Nullfall keine weitere Rückkopplung in die Abfahrtszeitwahl und damit Berechnung der Korrekturmatrizen statt, da die grundlegende Nachfragematrixganglinie aus dem MZMV vorbehaltlich der vorgenommenen Rundungen und Null-Setzungen als empirisch vorgegeben betrachtet wird.

Es folgt im Gegensatz zum Anwendungsfall anschliessend direkt die Hochrechnung der zeitscheibenfein vorliegenden MIV-Kenngrössenmatrizen auf 24h-MIV-Kenngrössenmatrizen für die Nachfrageberechnung. Die Gewichtung der Kenngrössen erfolgt über die Nachfragematrixganglinie aus dem MZMV, wobei als MIV-Kenngrössenmatrizen für Zeiten ausserhalb des betrachteten Zeitraums die t_0 -Matrix bzw. eine initiale Distanzmatrix verwendet wird. Dies erfolgt aus Konsistenzgründen um in den berechneten Testszenarien (siehe Kapitel 6) keine speziellen Annahmen über Grössen ausserhalb des betrachteten Zeitraums treffen zu müssen und die Effekte zwischen Null- und Anwendungsfall isoliert betrachten zu können.

5.1.3 MIV-Anwendungsfall

5.1.3.1 Befristete MIV-Attribute

Zum Vorhalten von zeitscheibenfeinen Werten für Maut und Kapazität in möglichen Szenarien von MIV-Anwendungsfällen werden entsprechende befristete Attribute (siehe Abbildung 15) angelegt.

Befristete Attribute			
Anzahl: 2	Objekt-	Attribut-ID	
1	Strecken	Kapazität IV	...
2	Strecken	Maut-IVSys	...

Abbildung 15: Befristete Attribute im MIV-Modell

Dafür muss zudem die Anpassung der Zeitintervallmengen auf die betrachteten Zeitscheiben erfolgen, da sich die zeitliche Ausprägung der befristeten Attribute an den dort festgelegten Analysezeitintervallen orientiert.

5.1.3.2 Spezielle PW-Verfahrensschritte

Für die Berechnung eines MIV-Anwendungsfalls wird vor der Berechnung von Umlegung und Abfahrtszeitwahl zunächst die Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Prog» des Anwendungsfall über die Differenz (bzw. optional das Verhältnis) zwischen der EVA-Matrix des Anwendungsfall aus der Nachfrageversion und der bestehenden EVA-Matrix des Nullfalls hochgerechnet. Die Differenz (bzw. das Verhältnis) wird dazu auf die Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Ana» des Nullfalls addiert (bzw. multipliziert). Anschliessend wird die so berechnete Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Prog» symmetrisiert. Im darauffolgenden Verfahrensschritt wird eine initiale Nachfragematrixganglinie für den Anwendungsfall erzeugt, indem die Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Prog» anhand der Tagesganganteile aus dem MZMV heruntergebrochen wird.

Diese Verfahrensschritte sind im NPVM angelegt aber so weit ausgeschaltet, da im Projekt keine Rückkopplung mit der Nachfrageversion vorgesehen war.

Zur anschliessenden Berechnung einer sinnvollen Abfahrtszeitwahl in der ersten Iteration sollten die Kenngrössenmatrizen des Nullfalls als Startlösung beibehalten werden. Bei Bedarf können auch die Kenngrössenmatrizen eines bereits berechneten und ähnlich gelagerten Anwendungsfalls manuell eingelesen werden. Dies kann u.U. die Konvergenz von Rückkopplung 3 beschleunigen, welche die Abfahrtszeitwahl und Umlegung (siehe Kapitel 3.2 und 2.2) über T_{akt} iteriert. Die Startkenngrössen werden anschliessend durch die Kenngrössenmatrizen des betrachteten Anwendungsfalls überschrieben.

Neben den identischen Verfahrensschritten zur Prüfung des Abbruchkriteriums der Rückkopplung 1 sind im MIV-Anwendungsfall zur Prüfung des Abbruchkriteriums der Rückkopplung 3 in der Gruppe «Iteration: Bis Ausgleich T_{akt} in Nachfrage» noch zwei weitere Verfahrensschritte angelegt. Auch hier erfolgt zunächst die Berechnung der relativen Änderung der mittleren Nachfrage über alle Relationen je betrachteter Zeitscheibe und anschliessend die Konvergenzfeststellung oder die Rückkopplung über die VISUM-Funktion «Bedingter Rücksprung». Die Funktion wird dabei über das binäre Netz-BDA «GG_Ausgleich_tAkt_Nachfrage» geschaltet.

Abschliessend erfolgt wie im Nullfall (siehe Kapitel 5.1.2.2) die Hochrechnung der zeitscheibenfein vorliegenden MIV-Kenngrössenmatrizen auf 24h-MIV-Kenngrössenmatrizen für die Nachfrageberechnung.

5.2 ÖV-Modell

Im ÖV-Umlegungsmodell des GVM Luzern müssen zur Abbildung der Wahl der Abfahrtszeit und zur Integration des dynamischen Umlegungsverfahrens die im folgenden erläuterten Aspekte angepasst werden. Grundsätzlich sind diese Anpassungen auch weitestgehend deckungsgleich in das ÖV-Modell des NPVM übernommen worden, wobei auf vereinzelte Abweichungen im Folgenden speziell eingegangen wird.

5.2.1 ÖV-Modell allgemein

5.2.1.1 ÖV-Verfahrensablauf

Zentrale Änderung ist die Integration eines neuen Verfahrensablaufes mit Berechnung der Abfahrtszeitwahl auf Basis des in Kapitel 3 beschriebenen Verschiebungsmechanismus und einer dynamischen Umlegung auf Basis des in Kapitel 1 beschriebenen Ansatzes sowie entsprechender Rückkopplungen und Verrechnungen.

Verfahren
▼ Gruppe ::: NULLFALL
▶ Gruppe Umlegung ÖV ...
▶ Gruppe KG Nullfall zeitscheibenfein ...
▶ Gruppe Nachfrage Nullfall (= Fakt.-/Diff.-Matrix) ...
▶ Gruppe KG Nullfall 24h (DWV) ...
▶ Gruppe Speichern KGM 24h (DWV) ...
▼ Gruppe ::: ANWENDUNGSFALL
▶ Gruppe Einlesen Nachfrage 24h (DWV) ...
▶ Gruppe ÖV: Hochrechnung Nachfrage 24h (DWV) ...
▶ Gruppe Erstellung Matrixganglinie ...
▶ Gruppe Nachfrage Anwendungsfall (+ Fakt.-/Diff.-Matrix) ...
▶ Gruppe Umlegung ÖV ...
▶ Gruppe KG Anwendungsfall zeitscheibenfein ...
▶ Gruppe Iteration: Bis Ausgleich t_{akt} in Nachfrage ...
▶ Gruppe KG Anwendungsfall 24h (DWV) ...
▶ Gruppe Speichern KGM 24h (DWV) ...

Abbildung 16: Übersicht Verfahrensgruppen im ÖV-Modell

Der Verfahrensablauf (siehe Abbildung 16) teilt sich auf in einen ersten Abschnitt mit Verfahrensschritten für die Berechnung des Analyse- bzw. Nullfalls (siehe Kapitel 5.2.2) und einen zweiten Abschnitt für die Berechnung des Prognose- bzw. Anwendungsfalls (siehe Kapitel 5.2.3).

5.2.1.2 ÖV-Matrizen

Im Gegensatz zum bestehenden tagesfeinen Modell müssen die Matrizen für Nachfrage- und Kenngrößen zeitscheibenfein angelegt werden. Dabei sind für folgende Größen jeweils 96 Matrizen für alle 15min-Zeitscheiben über den Tag zu erstellen:

- Nachfragematrizen des Analyse- bzw. Nullfalls
 - «OeV_NFM_ ... _Ana» Matrixganglinie M_i^{ATGL} aus MZMV
 - «OeV_NFM_ ... _Ana_unkorrigiert» Unkorrigierte Matrizen aus Abfahrtszeitwahl $M_i^{Aunkorr}$

«OeV_NFM_ ... _Ana_Differenz»	Korrekturmatrizen $M_i^{ATGL} - M_i^{Aunkorr}$
«OeV_NFM_ ... _Ana_Verhaeltnis»	Korrekturmatrizen $\frac{M_i^{ATGL}}{M_i^{Aunkorr}}$
• Nachfragematrizen des Prognose- bzw. Anwendungsfalls	
«OeV_NFM_ ... _Prog»	Ergebnismatrixganglinie M_i^{PTGL}
«OeV_NFM_ ... _Prog_unkorrigiert»	Unkorrigierte Matrizen aus Abfahrtszeitwahl $M_i^{Punkorr}$
• Kenngrößenmatrizen (Matrixname für Berechnung in Matrix-BDA «Name_Erweitert»)	
«OeV_KGM_ ... _RITA»	Ergebniskenngrösse Beförderungszeit angepasst
«OeV_KGM_ ... _NTR»	Ergebniskenngrösse Umsteigehäufigkeit
«OeV_KGM_ ... _RID»	Ergebniskenngrösse Beförderungsweite
«OeV_KGM_ ... _FAR»	Ergebniskenngrösse Fahrpreis
«OeV_KGM_ ... _PLA»	Ergebniskenngrösse ÖV-Auslastung (Attribut für Teilweg-Kenngröße ÖV)
«OeV_KGM_ ... _EJT»	Ergebniskenngrösse Takt (Reisezeitäquivalent)
• Hilfsmatrizen für Rückkopplung und Abbruchkriterien	
«OeV_NFM_ ... _Iter-1_Nachfrage»	Vergleichsmatrix Iteration-1 für Abbruchkriterium Rückkopplung 3

Die Kenngrößen- und Hilfsmatrizen werden dabei sowohl im Analyse- bzw. Nullfall als auch im Prognose- bzw. Anwendungsfall verwendet, d.h. sie werden im Ablauf entsprechend überschrieben.

Ferner sind speziell für den Berechnungsablauf folgende einzelne Matrizen angelegt:

«OeV_NFM_24h_Ana»	DWV-Nachfrage aus MZMV (Analyse- bzw. Nullfall)
«OeV_NFM_EVA_24h_Ana»	EVA-Nachfrage (DWV) des Analyse- bzw. Nullfalls
«OeV_NFM_EVA_24h_Prog»	EVA-Nachfrage (DWV) des Prognose- bzw. Anwendungsfalls
«OeV_NFM_24h_Prog_Absolut»	Korrekturmatrix (Differenz) für Hochrechnung EVA-Nachfrage auf DWV-Nachfrage im Prognose- bzw. Anwendungsfall
«OeV_NFM_24h_Prog_Relativ»	Optional: Korrekturmatrix (Verhältnis) für Hochrechnung EVA-Nachfrage auf DWV-Nachfrage im Prognose- bzw. Anwendungsfall
«OeV_NFM_24h_Prog»	DWV-Nachfrage des Prognose- bzw. Anwendungsfalls

«OeV_NFM_XXh_Prog»	DWV-Nachfrage des betrachteten Zeitraums (Prognose- bzw. Anwendungsfall) mit XXh von 01h bis max. 24h
«Schalter Aussenverkehr»	Schaltermatrix für die Übernahme der Aussenverkehre des Analyse- bzw. Nullfall in den Prognose- bzw. Anwendungsfall
«RITA_Init»	ÖV-Kenngrösse RITA initial
«RITA_24h»	ÖV-Kenngrösse RITA für den DWV (Übernahme in das Nachfragemodell)
«NTR_24h»	ÖV-Kenngrösse NTR für den DWV (Übernahme in das Nachfragemodell)
«FAR_24h»	ÖV-Kenngrösse FAR für den DWV (Übernahme in das Nachfragemodell)
«PLA_24h»	ÖV-Kenngrösse PLA für den DWV (Übernahme in das Nachfragemodell)

5.2.1.3 ÖV-Nachfragesegmente und -Nachfragedaten

In den ÖV-Nachfragedaten erfolgt die Verknüpfung der angelegten zeitscheibenfeinen Nachfragematrizen für den Analyse- bzw. Nullfall und den Prognose- bzw. Anwendungsfall mit zwei entsprechenden Nachfrageganglinien. Diese werden dann im Verfahrensablauf, je nachdem ob eine Umlegungs- bzw. KG-Berechnung für den Analyse- bzw. Nullfall oder den Prognose- bzw. Anwendungsfall durchgeführt wird, als Umlegungsmatrixganglinie gesetzt.

5.2.1.4 Allgemeine ÖV-Verfahrenseinstellungen

Für die Berechnung der ÖV-Auslastung über die Teilweg-Kenngrösse (PLA, siehe auch Kapitel 2.3) werden in den allgemeinen ÖV-Verfahrenseinstellungen die Optionen Wege als Verbindungen zu speichern, Belastungen zusätzlich für Fahrplanfahrten zu speichern und Wege-Belastungen je Nachfrageintervall zu speichern ausgewählt.

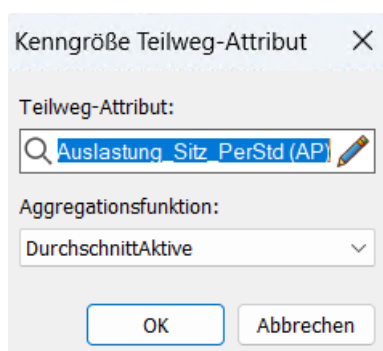


Abbildung 17: Ermittlung der ÖV-Teilweg-Kenngrösse

Ferner wird die Berechnung der Teilweg-Kenngrösse gemäss Abbildung 17 festgelegt. Dabei wird der Durchschnitt der ÖV-Sitzplatzauslastung über alle aktiven ÖV-Teilwege gemäss ÖV-Linienfilter gebildet.

5.2.1.5 Benutzerdefinierte Attribute (BDA)

Im ÖV-Modell werden BDAs auf Streckenebene für die ÖV-Auslastungsberechnung («Auslastung_Sitz_PerStd» und «Auslastung_Gesamt_PerStd»), auf Netzebene als

Schalter für das Abbruchkriterium der Rückkopplung 3 über die Abfahrtszeitwahl («GG_Ausgleich_PLA_Nachfrage») sowie auf Matrixebene als Hilfs-BDA («Name_Erweitert») für den Aufruf der KG-Matrizen durch Berechnungsskripte im Verfahrensablauf angelegt.

5.2.2 ÖV-Nullfall

5.2.2.1 ÖV-Nachfragegrundlagen

Als Grundlage für die Berechnung des Nullfalls und damit der Korrekturmatrizen für Anwendungsfälle wird eine zeitscheibenfeine Matrixganglinie für 15min-Zeitscheiben aus dem MZMV verwendet. Im GVM Luzern liegen hier alle 96 15min-Zeitscheiben über den Tag vor, welche aufaddiert die Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Ana» ergeben. Im NPVM sind hier u.a. zur Reduzierung der Dateigrösse nur alle 15min-Zeitscheiben für den betrachteten Zeitraum inklusive einer zulässigen Verschiebung der Abfahrtszeit vor einer Stunde (05:00-10:00 Uhr, siehe Kapitel 6) vorhanden.

5.2.2.2 Spezielle ÖV-Verfahrensschritte

Für die Berechnung des Nullfalls werden neben den Verfahrensschritten zur Berechnung der fahrplanfeinen Umlegung und der Korrekturmatrizen der Abfahrtszeitwahl (Verschiebungsmechanismus) noch weitere begleitende Verfahrensschritte ausgeführt.

Zum einen erfolgt wie im MIV-Modell vor Berechnung von Umlegung und der Korrekturmatrizen eine Rundung der zeitscheibenfeinen Matrixganglinie aus dem MZMV auf die zehnte Nachkommastelle sowie das Setzen von Matrixwerten in der Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Ana» unter einem festgelegten Grenzwert auf Null.

Anschliessend folgt die Einstellung der Umlegungsmatrixganglinie in den ÖV-Nachfragedaten für den Analyse- bzw. Nullfall.

Nach der Berechnung von Umlegung, Kenngrössen und Korrekturmatrizen (Abfahrtszeitwahl) findet wie im MIV-Nullfall auch für den ÖV im Nullfall keine weitere Rückkopplung in die Abfahrtszeitwahl und damit Berechnung der Korrekturmatrizen statt.

Es folgt ebenfalls wie im MIV-Nullfall anschliessend direkt die Hochrechnung der zeitscheibenfein vorliegenden ÖV-Kenngrössenmatrizen auf 24h-ÖV-Kenngrössenmatrizen für die Nachfrageberechnung. Die Gewichtung der Kenngrössen erfolgt über die Nachfragematrixganglinie aus dem MZMV, wobei als ÖV-Kenngrössenmatrizen für Zeiten ausserhalb des betrachteten Zeitraums die Durchschnittswerte des betrachteten Zeitraums verwendet werden.

5.2.3 ÖV-Anwendungsfall

5.2.3.1 ÖV-Angebot

Die Implementierung der ÖV-Szenarien erfolgt für diejenigen mit Preiselementen (km abhängig oder wegen bestimmten Elementen) mit der Funktion Tarifpunkte. Da der Zusatzpreis nur für kurze Zeitperiode gilt, müssen alle Kurse, welche betroffen sind, separiert und zu Linien mit geänderten Verkehrssystemen (Bus Zuschlag und Regionalverkehr RV Zuschlag) umgebaut werden.

Danach müssen die betreffenden Strecken mit den Tarifpunkten versehen werden.

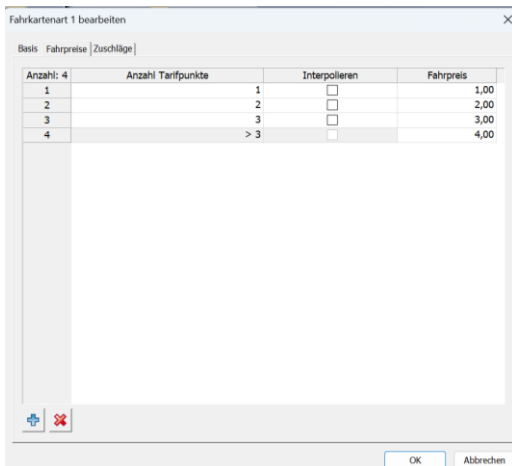


Abbildung 18: Tarifpunkte im ÖV-Modell

Die Implementierung der zeitabhängigen ÖV-Preise ist sehr arbeitsintensiv. Wenn das System implementiert ist und man nur die Preisniveaus ändern möchte, dann können diese Anpassungen wiederum sehr einfach im Reiter Fahrkartenart erfolgen.

5.2.3.2 Spezielle ÖV-Verfahrensschritte

Gruppe
Gruppe :: ANWENDUNGSFALL				::: ANWENDUNGSFALL
Gruppe Einlesen Nachfrage 24h (DWV) ...	0 / 2			Einlesen Nachfrage 24h (DWV)
Gruppe ÖV: Hochrechnung Nachfrage 24h (DWV) ..	0 / 4			ÖV: Hochrechnung Nachfrage 24h (DWV)
Gruppe Erstellung Matrixganglinie	1 / 1			Erstellung Matrixganglinie
Skript ausführen				Erstellung Matrixganglinie
Gruppe Nachfrage Anwendungsfall (+ Fakt.-/Diff.-	2 / 2			Nachfrage Anwendungsfall (+ Fakt.-/Diff.-Matrix)
Skript ausführen				Logit-Ansatz Anwendungsfall 31.10.2024 (RAM-reduziert)
Skript ausführen				Anwendungsfall NFM runden
Gruppe Umlegung ÖV	5 / 5			Umlegung ÖV
Skript ausführen				Matrixganglinie Anwendungsfall einstellen
Umlegungsergebnisse löschen		Ale		
ÖV-Umlegung	ÖV ÖV	...	Fahrplanfen	Uml_OEV
ÖV-betriebliche Kennzahlen zurücksetzen				
ÖV-betriebliche Kennzahlen				
Gruppe KG Anwendungsfall zeitscheibenfein	1 / 1			KG Anwendungsfall zeitscheibenfein
ÖV-Kenngrößenmatrix berechnen	ÖV ÖV	...	Fahrplanfen	KGM rechnen (Kein FAR)
Gruppe Iteration: Bis Ausgleich t_akt in Nachfrage	2 / 2			Iteration: Bis Ausgleich PLA in Nachfrage
Skript ausführen				Berechnen Ausgleich PLA in Nachfrage
Bedingter Rücksprung	Verfahren 57	...		
Gruppe KG Anwendungsfall 24h (DWV)	1 / 1			KG Anwendungsfall 24h (DWV)
Skript ausführen				KGM 24h aus zeitscheibenfeinen KG

Abbildung 19: Verfahrensguppen im ÖV-Modell

Für die Berechnung eines ÖV-Anwendungsfalls (Abbildung 19) wird identisch zum MIV-Modell (siehe Abschnitt 5.1.3.2) vor der Berechnung von Umlegung und Abfahrtszeitwahl zunächst die Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Prog» des Anwendungsfall über die Differenz (bzw. optional das Verhältnis) zwischen der EVA-Matrix des Anwendungsfall aus der Nachfrageversion und der bestehenden EVA-Matrix des Nullfalls hochgerechnet. Ebenso wird im darauffolgenden Verfahrensschritt eine initiale Nachfragematrixganglinie für den Anwendungsfall erzeugt, indem die Tagesmatrix «PW_NFM_24h_Prog» anhand der Tagesganganteile aus MZMV heruntergebrochen wird.

Wie im MIV-Anwendungsfall sollten zur Berechnung einer sinnvollen Abfahrtszeitwahl in der ersten Iteration die Kenngrößenmatrizen des Nullfalls als Startlösung zunächst beibehalten werden. Sie werden anschliessend durch die Kenngrößenmatrizen

des Anwendungsfalls überschrieben. In diesem Zusammenhang ist speziell zu beachten, dass die ÖV-Kosten nur im Anwendungsfall standardmässig in der Abfahrtszeitwahl und der Routenwahl mitberücksichtigt werden. Im Nullfall erfolgt dies nicht, der Nutzenparameter in der Abfahrtszeitwahl sowie der Fahrpreisparameter im Routenwiderstand ist hier mit Null gesetzt.

Ebenso wie im MIV-Anwendungsfall sind im ÖV-Anwendungsfall zur Prüfung des Abbruchkriteriums der Rückkopplung 3 in der Gruppe «Iteration: Bis Ausgleich PLA in Nachfrage» zwei Verfahrensschritte angelegt. Es erfolgt in Ersterem ebenso die Berechnung der relativen Änderung der mittleren Nachfrage über alle Relationen je betrachteter Zeitscheibe und in Zweiterem die Schaltung der VISUM-Funktion «Bedingter Rücksprung» über ein binäres Netz-BDA «GG_Ausgleich_PLA_Nachfrage».

Abschliessend erfolgt wie im Nullfall die Hochrechnung der zeitscheibenfein vorliegenden ÖV-Kenngrössenmatrizen auf 24h-ÖV-Kenngrössenmatrizen für die Nachfrageberechnung.

5.3 Nachfragemodell

Im Nachfragemodell wird eine EVA-Berechnung auf Basis der 24h-Kenngrößen aus MIV- und ÖV-Modell berechnet und die entstehenden PW- und ÖV-EVA-Nachfragematrizen wieder zurück in die entsprechenden Modelle gespielt. Diese Rückkopplung in das Nachfragemodell bietet damit zusätzlich zur Abbildung von Abfahrtszeit- und Routenwahl in den Umlegungsmodellen die Möglichkeit auch die Ziel- und Moduswahl unter Berücksichtigung zeitscheibengewichteter 24h-Kenngrößen zu berechnen.

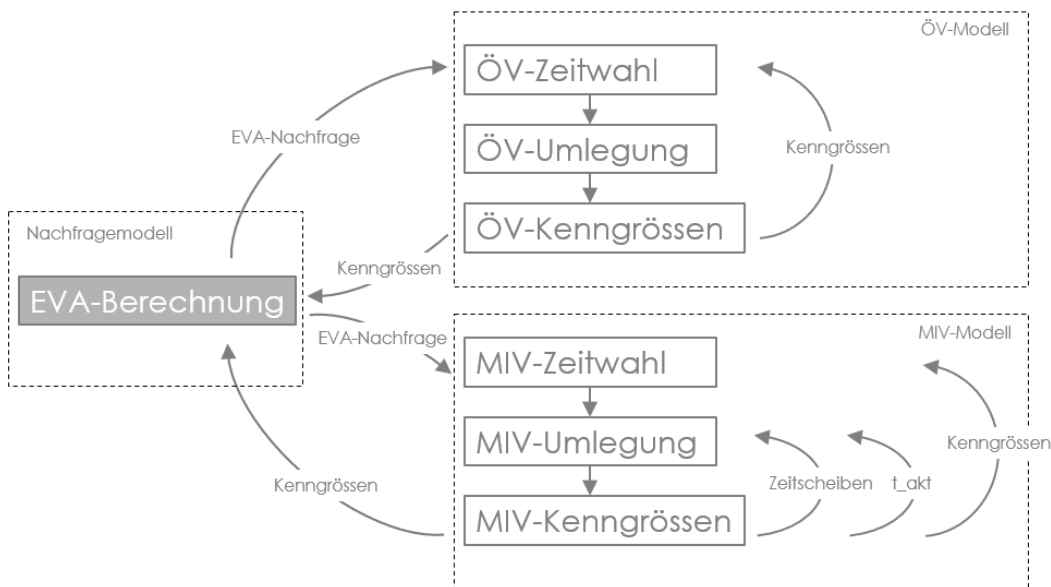


Abbildung 20: Nachfrageberechnung in Grau im Ablaufschema des Gesamtmodells (Dynamische Umlegung inklusive Wahl der Abfahrtszeit)

Der schematische Zusammenhang des Nachfragemodells mit dem MIV- und ÖV-Modell ist in Abbildung 20 dargestellt. Die Rückkopplung mit den Umlegungsmodellen wird dabei vollständig aus dem Nachfragemodell gesteuert, d.h. die Umlegungsmodelle werden durch den Verfahrensablauf im Nachfragemodell aufgerufen. Berechnungsergebnis der Rückkopplung sind die EVA-Matrizen der vier Verkehrsmodi (Fuss, Velo, PW und ÖV) im Nachfragemodell. Sie werden zugleich auch extern als Matrixdateien gespeichert. Eine Rückkopplungsrechnung ist nur für den Prognose- bzw. Anwendungsfall vorgesehen, da im Analyse- bzw. Nullfall mit einer empirischen Matrixganglinie aus dem MZMV gearbeitet wird und somit keine Nachfragereaktion auf die veränderten EVA-Matrizen erfolgt.

91	Verfahren	Bezugsobjekt(e)	Variante/Datei	Kommentar
1	▼ Gruppe (ZS) Initialisierung	1 / 1		(ZS) Initialisierung
2	Skript ausführen			(ZS) Rückkopplung: Tabelle_Auswertung und GG_Schaetzzeit wird initialisiert
3	▼ Gruppe (ZS) Initiale Kenngrößenmatrix: 4 / 4			(ZS) Initiale Kenngrößenmatrizen berechnen
4	Matrix speichern	4 PW: Nachfrag...	03_PW.mtx	(ZS) PW Nullfall
5	Matrix speichern	5 ÖV: Nachfrage ...	04_ÖV.mtx	(ZS) ÖV Nullfall
6	Skript ausführen			(ZS) Initiale PW-KGM in externer Umlegungsversion berechnen
7	Skript ausführen			(ZS) Initiale ÖEV-KGM in externer Umlegungsversion berechnen
8	▼ Gruppe ::: Start Rückkopplung *****			::: Start Rückkopplung *****

Abbildung 21: Verfahrensgruppen im Nachfragemodell zu Beginn der Rückkopplungsrechnung

Der bestehende Verfahrensablauf des GVM Luzern wird zur Durchführung dieser Rückkopplung um Verfahrensgruppen zu Beginn des Ablaufes erweitert, die neben einer Initialisierung der Rückkopplungsrechnung die initialen Kenngrößenmatrizen in den Umlegungsmodellen berechnen und in das Nachfragemodell übernehmen (siehe Abbildung 21). Als initiale EVA-Matrizen zu Berechnung der Kenngrößenmatrizen werden die EVA-Matrizen des Nullfalls verwendet, die standardmässig im Nachfragemodell hinterlegt werden. Ihre Berechnung erfolgt zuvor ohne Rückkopplung durch eine einfache Übernahme der Kenngrößenmatrizen des Nullfalls in das Nachfragemodell.

91	Verfahren	Bezugsobjekt(e)	Variante/Datei	Kommentar
80	▼ Gruppe (ZS) ::: PW- & OEV-Umlegungen	2 / 2		(ZS) ::: PW- & OEV-Umlegungen
81	Skript ausführen			(ZS) PW-KGM und Umlegung in externer Umlegungsversion berechnen
82	Skript ausführen			(ZS) OEV-KGM und Umlegung in externer Umlegungsversion berechnen
83	▼ Gruppe (ZS) ::: Rücksprung Rückkopplung	4 / 4		(ZS) ::: Rücksprung Rückkopplung
84	Matrix öffnen	3001 PW: Fahrtz ...	GVM_LU.TTC	(ZS) PW: Fahrtzeitmatrix einlesen
85	Kombination von Matrizen und Vektoren	Matrix([NR] = 3) ...		(ZS) Mitteil der Kenngrösse PW-Fahrtzeit
86	Matrix speichern	3005 PW: Fahrtz ...	GVM_LU.TTC	(ZS) Glättung über MSA
87	Bedingter Rücksprung	Verfahren 10 ...		(ZS) Abbruchprüfung Rückkopplung
88	▼ Gruppe ::: Ende Rückkopplung *****			::: Ende Rückkopplung *****

Abbildung 22: Verfahrensgruppen im Nachfragemodell zu Ende der Rückkopplungsrechnung

Weiter wird der bestehende Verfahrensablauf am Ende um Verfahrensgruppen zum Abschluss bzw. zur Durchführung des Rücksprungs in der Rückkopplungsrechnung erweitert (siehe Abbildung 22). Dabei werden in jeder Rückkopplung nach der Berechnung der EVA-Nachfrage im Nachfragemodell die Umlegungsmodelle aufgerufen und die Kenngrößenmatrizen auf Basis dieser EVA-Nachfrage berechnet. Ebenso erfolgt hier in jeder Rückkopplung die Prüfung des Abbruchkriteriums, welches unter Berücksichtigung einer MSA-Glättung die absolute Änderung der PW-Kenngrösse T_{akt} betrachtet. Die Abfrage des Abbruchkriteriums erfolgt direkt im VISUM-Verfahrensschritt «Bedingter Rücksprung» (siehe Abbildung 23).

Parameter Bedingter Rücksprung ✕

Rücksprung zu Verfahren (Gruppe 'Gruppe IV-Kenngrößenmatrizen öffnen und be...

Wenn _____

Anzahl Iterationen (Mindestanzahl)

oder _____

für mindestens ein Netzelement

$ABS(X(n) - X(n-1)) > MIN(0.01 * MAX(X(n), X(n-1)) + 0, 10)$

mit X _____

Streckenattribut

Matrix

der Wert des Netzattributs >

und Anzahl Iterationen (Maximale Anzahl)

Abbildung 23: Abbruchkriterium im Nachfragemodell

Mit dem vorliegenden Abbruchkriterium auf Basis der PW-Kenngrösse T_{akt} wird hier ein gängiger Weg gewählt, der auch bei anderen, ausschliesslich tagesfein rechnenden Modellen eingesetzt wird.

Die Festlegung, welche Umlegungsmodelle im Rahmen der Rückkopplung aufgerufen werden sollen, erfolgt in der benutzerdefinierten Tabelle «Versionen», wo die Versionsnamen sowie der Name der Pfaddatei einzutragen ist (siehe Abbildung 24). Die Pfaddatei muss in diesem Fall auf die Ordner verweisen, in denen die Umlegungsmodelle gespeichert sind und gleichzeitig auch auf den Ordner, in dem die Pfaddatei selbst liegt.

Versionen						
Anzahl	Nr	Code	Name	Pfad	Ver_OeV	Ver_PW
1	1	PV	PV	GVM_Luzern_dynamisch.pfd	GVM_LU_ÖV_15min_20240918_gerechnet_VISUM24_Szenario_A.ver	GVM_LU_MIV_15min_20240918_gerechnet_VISUM24_Szenario_A.ver

Abbildung 24: Festlegung der Umlegungsmodelle und Pfaddatei

Innerhalb der Verfahrensgruppen zur EVA-Berechnung im Nachfragemodell wird als Anpassung zusätzlich die PW-Kenngrösse Maut aufgerufen und mit der bisher im GVM Luzern ausschliesslich über einen Distanzkostenfaktor ermittelten PW-Kenngrösse Kosten verrechnet (siehe Abbildung 25).

```

Formel für Matrix bearbeiten

Definieren Sie eine Ergebnismatrix. Existierende Matrizen werden überschrieben, nicht
existierende erzeugt.
Beispiel: Matrix([Nr]=1) := Matrix([Nr]=2) * Matrix([Nr]=3)
Weitere Beispiele
Matrix([CODE] = "PW: Kosten")
:=
SYMMETRIZE
(
Matrix([CODE] = "PW: Distanz") * 0.16
)
+
Matrix([CODE] = "PW: Maut")

```

Abbildung 25: Verrechnung der PW-Kenngrösse Maut mit den PW-Kenngrösse Kosten

Gleiches erfolgt für den ÖV, wobei die ÖV-Kenngrösse Kosten aus dem Umlegungsmodell übernommen und anschliessend um die bisher ausschliesslich betrachtete ÖV-Kostengrösse auf Basis von Beförderungsweite und Kostenfaktor erweitert wird (siehe Abbildung 26). Zu beachten ist hierbei, dass in den vorliegenden Testszenarien des GVM Luzern im Analyse- bzw. Nullfall keine ÖV-Kosten im Umlegungsmodell berücksichtigt und demnach berechnet werden. Dies erfolgt nur für den Prognose- bzw. Anwendungsfall.

```

Formel für Matrix bearbeiten

Definieren Sie eine Ergebnismatrix. Existierende Matrizen werden überschrieben, nicht
existierende erzeugt.
Beispiel: Matrix([Nr]=1) := Matrix([Nr]=2) * Matrix([Nr]=3)
Weitere Beispiele
Matrix([CODE] = "ÖV: Kosten")
:=
SYMMETRIZE
(
Matrix([CODE] = "ÖV: Beförderungsweite") * 0.20
)
+
Matrix([CODE] = "ÖV: Kosten")

```

Abbildung 26: Verrechnung der ÖV-Kenngröße Kosten mit den ÖV-Kosten aus dem Umlegungsmodell

Da im vorliegenden Projekt keine Kalibrierung von Nachfrage- und Umlegungsmodellen stattfindet, erfolgt zur Erhöhung der Konsistenz der Berechnung eine Übernahme gesperrter ÖV-Relationen für die ÖV-Kenngrößen Fahrtzeit, Kosten und Anzahl Umsteigevorgänge (siehe Abbildung 27).

```

Formel für Matrix bearbeiten

Definieren Sie eine Ergebnismatrix. Existierende Matrizen werden überschrieben, nicht
existierende erzeugt.
Beispiel: Matrix([Nr]=1) := Matrix([Nr]=2) * Matrix([Nr]=3)
Weitere Beispiele
Matrix([CODE] = "ÖV: Fahrtzeit")
:=
IF(Matrix([CODE] = "ÖV: Fahrtzeit kalibriert") > 1000,
Matrix([CODE] = "ÖV: Fahrtzeit kalibriert"), Matrix
([CODE] = "ÖV: Fahrtzeit"))

```

Abbildung 27: Übernahme gesperrter ÖV-Relationen für die ÖV-Kenngröße Fahrtzeit

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang auch, dass die ÖV-Kenngrößen Beförderungsweite, Reiseweite, Zugangszeit, Abgangszeit, Takt nicht rückgekoppelt, sondern konstant gehalten werden. Die neu im Umlegungsmodell berechnete ÖV-Kenngröße der ÖV-Auslastung wird nicht in der Nachfrageberechnung berücksichtigt.

Bei Start einer Rückkopplungsrechnung im Nachfragemodell ist zunächst zu prüfen, ob auf der verwendeten VISUM-Lizenz mindestens eine freie VISUM-Version vorhanden ist, damit MIV- und ÖV-Modell hintereinander aufgerufen und berechnet werden können. Auch können in der gleichen Ordnerstruktur nicht zwei Nachfrageberechnung gleichzeitig gerechnet werden.

6 Testszenarien

Folgende Rahmenbedingungen wurden für die Testszenarien festgelegt:

- Betrachtet für die Wahl der Abfahrtszeit wird der Zeitraum zwischen 06:00 bis 9:00 Uhr im Sinne einer möglichen Verschiebung der Abfahrtszeit innerhalb der morgendlichen Spitzenzeitperiode. Die preislichen bzw. kapazitätserhöhenden Massnahmen sind immer in der Morgenspitzenstunde von 7 bis 8 Uhr wirksam.
- Die maximal zulässige Verschiebung für Fahrten innerhalb dieses Zeitraums wird auf eine Stunde festgelegt.
- Für Zeitscheiben ausserhalb des betrachteten Zeitraums erfolgt keine eigenständige Berechnung von Kenngrössen, sondern es wird eine initiale Distanzmatrix sowie die t_0 -Matrix verwendet. Dies geschieht vor dem Hintergrund, möglichst wenig Annahmen über nicht betrachtete Zeiträume treffen zu müssen und hier Konsistenz zwischen Nullfall und verschiedenen Anwendungsfällen herzustellen.
- Für die Aussenverkehre wird keine Wahl der Abfahrtszeit berechnet, sondern der empirische Tagesgang aus den Zählraten sowohl im Null- als auch Anwendungsfall konstant gehalten.

6.1 Testszenario A

6.1.1 Definition Testszenario A

Testszenario A wird im GVM Luzern inklusive einer EVA-Nachfrageberechnung (Ziel- und Moduswahl) durchgeführt. Angenommen wird ein Kordonpricing von 7-8 Uhr an den Grenzen der Stadt Luzern (siehe Abbildung 28) mit folgender Bepreisung: ÖV-Weg 1 CHF und PW-Fahrt 3 CHF.



Abbildung 28: Übersicht Stadtgrenze Luzern

Durchfahrten auf der Autobahn A2 bleiben dabei weiterhin mautfrei, eine Ein- oder Ausfahrt ins bzw. aus dem Pricinggebiet wird auf der jeweiligen Autobahnrampe bemautet. Die Kordongrenze (Stadtgrenze) südlich des Seetalplatzes wurde angepasst, damit die Autobahnabfahrt Emmen Süd Richtung Emmenbrücke nicht bemautet wird.

Im ÖV wurden die Linien des Regionalverkehrs für Bahn und Busse, welche zwischen 7-8 Uhr die Grenze der Stadt Luzern überqueren, als eigene Linien definiert. Diese Linien erhielten danach ein eigenes Verkehrssystem (RV-Zuschlag bzw. Bus Zuschlag) mit einem Preiszuschlag, dies ist aus modelltechnischen Anforderungen notwendig.

Die Grenzstrecke der Kordonzone wurde danach im Streckenattribut Anzahl Tarifpunkte für die beiden Verkehrssysteme mit einer Eins versehen. Unter Netze - ÖV-Fahrpreise – Fahrkartenart wurde danach die Einstellung getroffen, wieviel je Tarifpunkt verrechnet wird, hier jeweils 1 CHF pro Tarifpunkt. Als Beispiel, auf der Relation von Emmenbrücke nach Ebikon über Luzern Bahnhof wird die Kordongrenze zweimal überschritten und dementsprechend 2 CHF verrechnet.

6.1.2 Gesamtnachfrageveränderung: Testscenario A

Die Auswertung der Nachfrageberechnung mit EVA zeigt die folgende Tabelle 5. Es wurden immer zwei Sensitivitäten mit einer Erhöhung der Bepreisung von 50% bzw. einer Verringerung von 30% zum Grundszenario gerechnet. Damit sollten die Änderung der Nachfragerreaktion gezeigt werden.

Die Kenngrößen für Velo und Fuss wurden aus dem Nullfall direkt übernommen, jedoch veränderten sich die relativen Angebotsverhältnisse zum PW, da Autofahrten aus der am stärksten belasteten Viertelstunde verschoben werden und somit die PW-Geschwindigkeit steigt. Die anderen Modi profitieren nicht von solchen Effekten, da der Fahrplan bzw. Fuss- und Velozeiten konstant bleiben.

TestszENARIO A: Ergebnis Nachfrage DWV				
Modus	Nullfall	Sz A (PW 3/ÖV 1 CHF)	SzA-Null	Rel SzA-Null
Fuss	523'032	521'579	-1'454	-0,28%
Velo	201'312	199'944	-1'368	-0,68%
PW-Wege	1'151'401	1'154'858	3'457	0,30%
PW-Fahrten	885'664	888'422	2'758	0,31%
ÖV	244'043	243'408	-635	-0,26%
plus 50%		Sz A (PW 4,5/ÖV 1,5 CHF)		
Fuss	523'032	522'623	-410	-0,08%
Velo	201'312	200'910	-403	-0,20%
PW-Wege	1'151'401	1'151'035	-366	-0,03%
PW-Fahrten	885'664	885'403	-261	-0,03%
ÖV	244'043	245'221	1178	0,48%
minus 30%		Sz A (PW 2,1/ÖV 0,7 CHF)		
Fuss	523'032	521'100	-1'932	-0,37%
Velo	201'312	199'514	-1'798	-0,89%
PW-Wege	1'151'401	1'156'353	4'952	0,43%
PW-Fahrten	885'664	889'613	3'950	0,45%
ÖV	244'043	242'821	-1'222	-0,50%

Tabelle 5: TestszENARIO A: Veränderungen DWV Nachfrage

Nur bei der Sensitivitätsrechnung mit plus 50% gleichen sich die Fahrzeitgewinne im MIV durch die gleichmässiger verteilte PW-Nachfrage mit den zusätzlichen Kosten aus und im ÖV resultiert ein Nachfragewachstum.

6.1.3 Auswertung TestszENARIO A: PW

Die Auswertung des Szenario A zeigt für PW eine Abnahme der Nachfrage im Anwendungsfall für den Zeitraum von 06:30-7:45 Uhr (siehe Abbildung 29). In den anderen betrachteten Zeiträumen (06:00-06:30 Uhr und 7:45-09:00 Uhr) ist hingegen eine Zunahme der PW-Nachfrage zu verzeichnen.

Erwartungsgemäss ist dieses Verhalten sowohl in der korrigierten Nachfrage als auch in der unkorrigierten Nachfrage zu erkennen. Die «gezackte» Form korrigierten Nachfrageverteilung kommt von der Tendenz von Befragten in Verkehrserhebungen, wie z.B. dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr, die runden Zeitangaben zur vollen Stunde bzw. halben Stunde häufiger zu rapportieren als andere Zeitangaben.

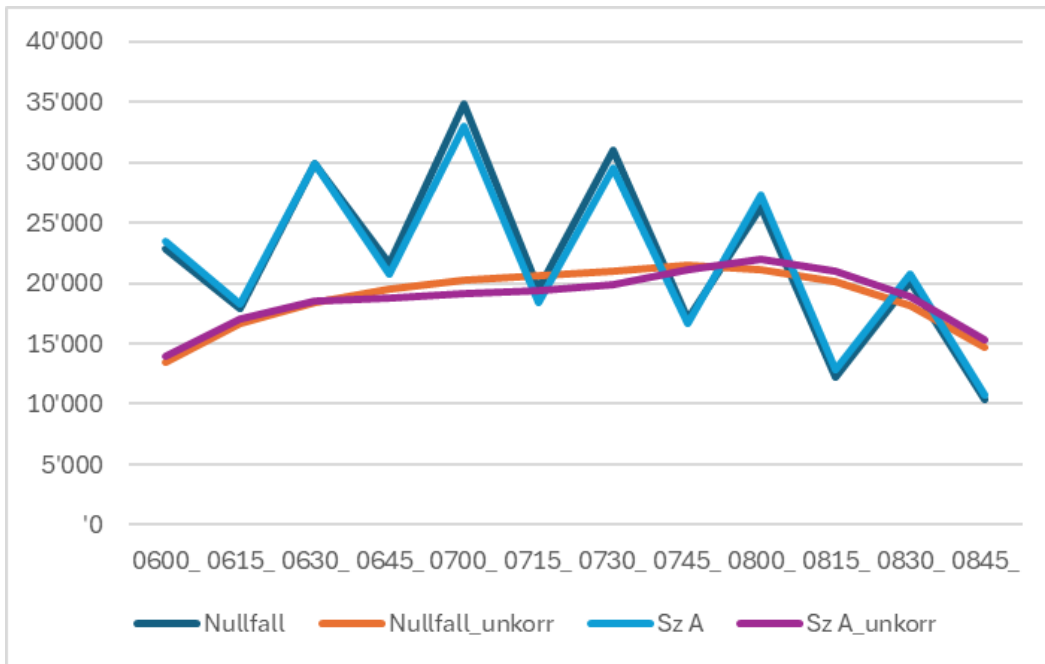


Abbildung 29: Veränderung der PW-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die Nachfragedifferenz zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum ist detailliert in Abbildung 30 dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich eine Verschiebung der PW-Nachfrage vor und nach der Pricing Periode von 7-8 Uhr.

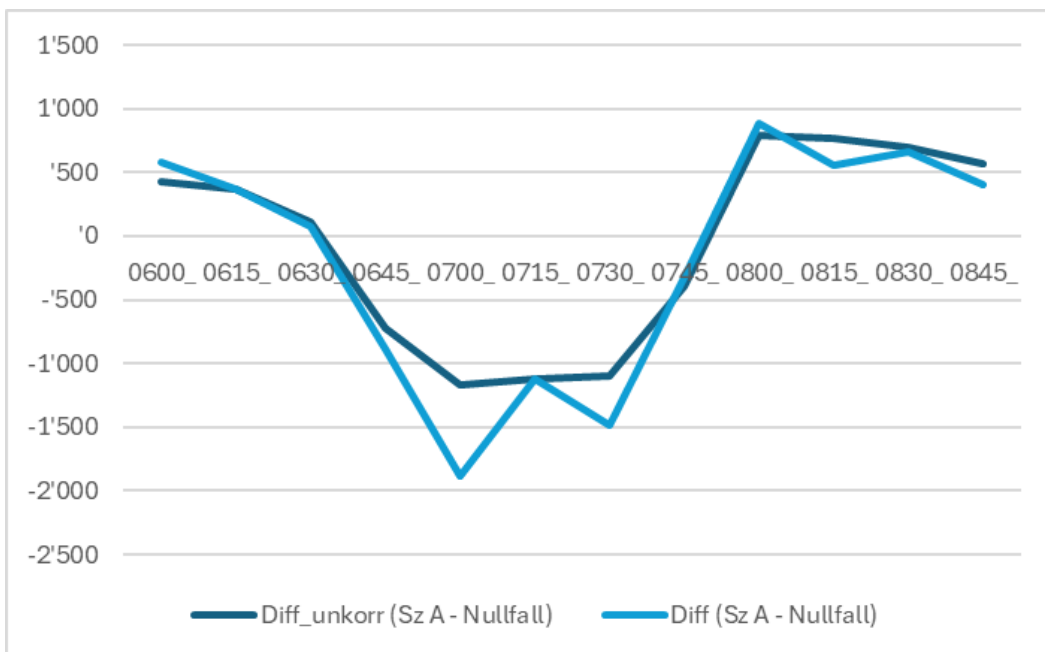


Abbildung 30: Veränderung der PW-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die Differenzen der Kenngrößen Distanz und T_{akt} zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum sind in Abbildung 31 dargestellt. Sie zeigen sich im Einklang mit den getroffenen Massnahmen und den ermittelten Nachfragedifferenzen.

Die Kenngrösse T_{akt} nimmt im Zeitraum vor 07:45 erwartbar durch die geringere Kapazitätsauslastung ab. Auch ist der Effekt vor- und nachlaufender Wege deutlich erkennbar, d.h. auch Wege beginnend vor 07:00 Uhr können im Schnitt von der gleichmässigeren Belastung profitieren. Die Kenngrösse Distanz zeigt über den gesamten betrachteten Zeitraum eine leichte Zunahme, da aufgrund des Kordonpricings Umwege gewählt werden.

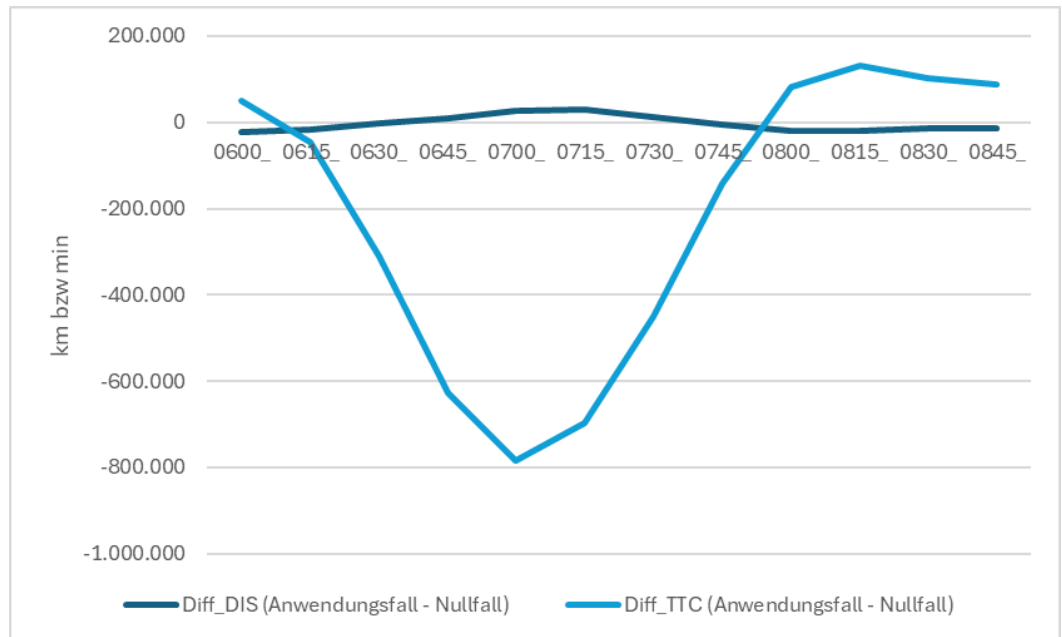


Abbildung 31: Veränderung der KG-Differenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen der Distanz und von T_{Akt}) zwischen Null- und Anwendungsfall

Insgesamt liegen die Ergebnisse des PW-Szenarios in einem nachvollziehbaren Bereich.

6.1.4 Auswertung Testszenario A: ÖV

Die Auswertung des Szenario A zeigt für den ÖV eine leichte Abnahme der Nachfrage im Anwendungsfall für den Zeitraum von 06:30–7:30 Uhr (siehe Abbildung 32). In den anderen betrachteten Zeiträumen (06:00–06:30 Uhr und 7:30–09:00 Uhr) ist hingegen eine Zunahme der ÖV-Nachfrage zu verzeichnen. Erwartungsgemäss ist dieses Verhalten sowohl in der korrigierten Nachfrage als auch in der unkorrigierten Nachfrage zu erkennen.

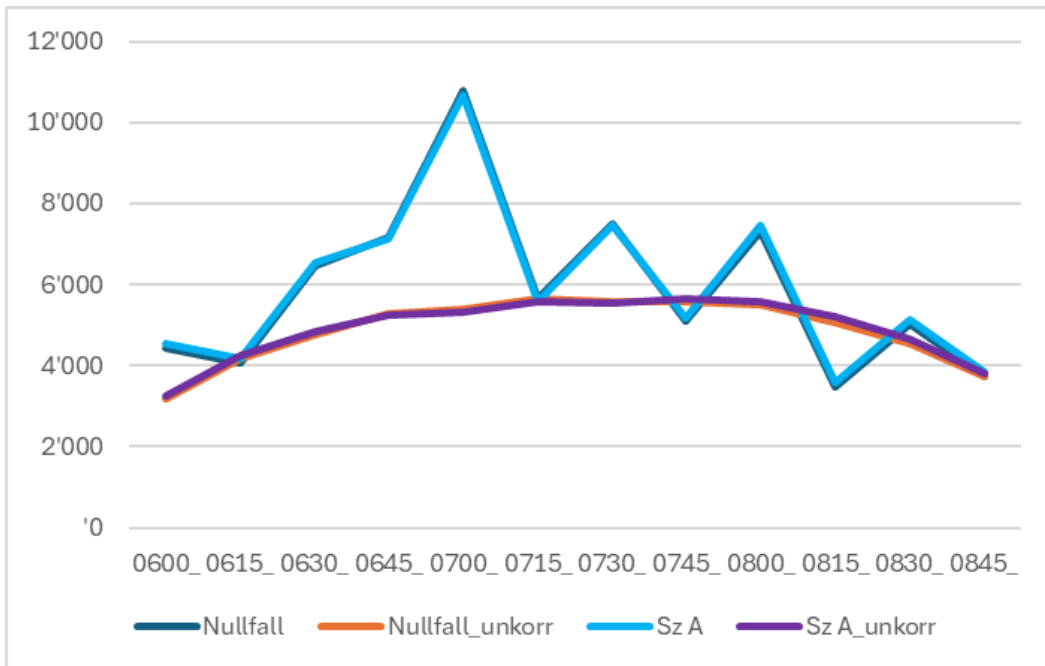


Abbildung 32: Veränderung der ÖV-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die Nachfragedifferenz zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum ist detailliert in Abbildung 33 dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich eine Verschiebung der ÖV-Nachfrage vor und nach der Pricing Periode von 7-8 Uhr.

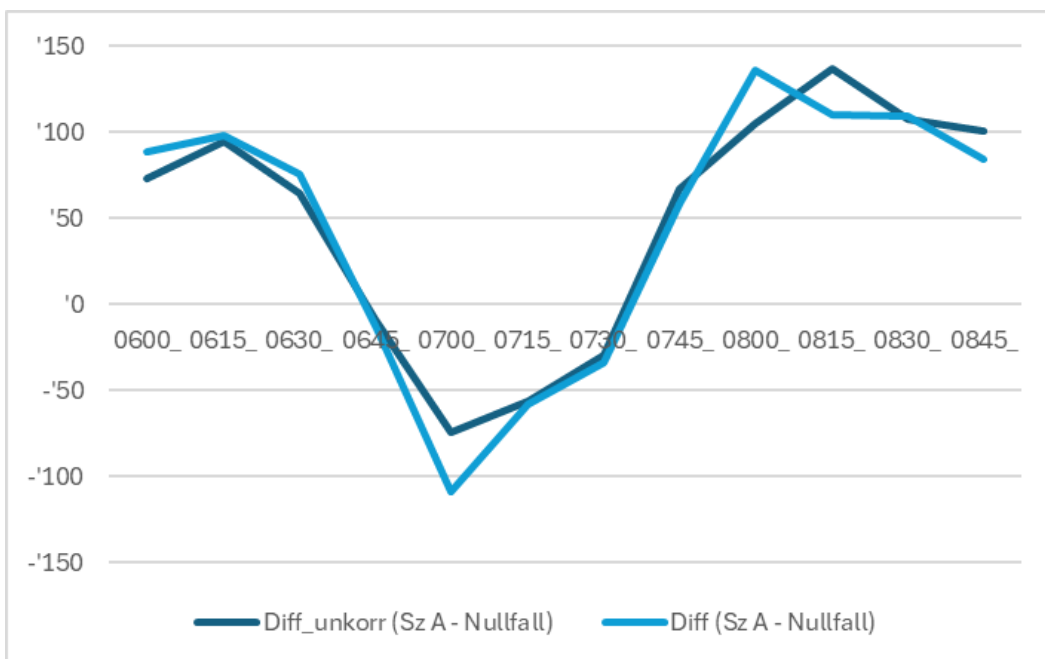


Abbildung 33: Veränderung der ÖV-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Insgesamt liegen die Ergebnisse des ÖV-Szenarios in einem nachvollziehbaren Bereich.

6.1.5 Sensitivitätsrechnungen TestszENARIO A: PW

Nachfolgend werden die Sensitivitäten (+50% und -30%) und das Grundszenario mit der Wirkung je Viertelstunde im betrachteten Zeitraum von 6 bis 9 Uhr verglichen. In Abbildung 34 sind die absoluten Veränderungen dargestellt.

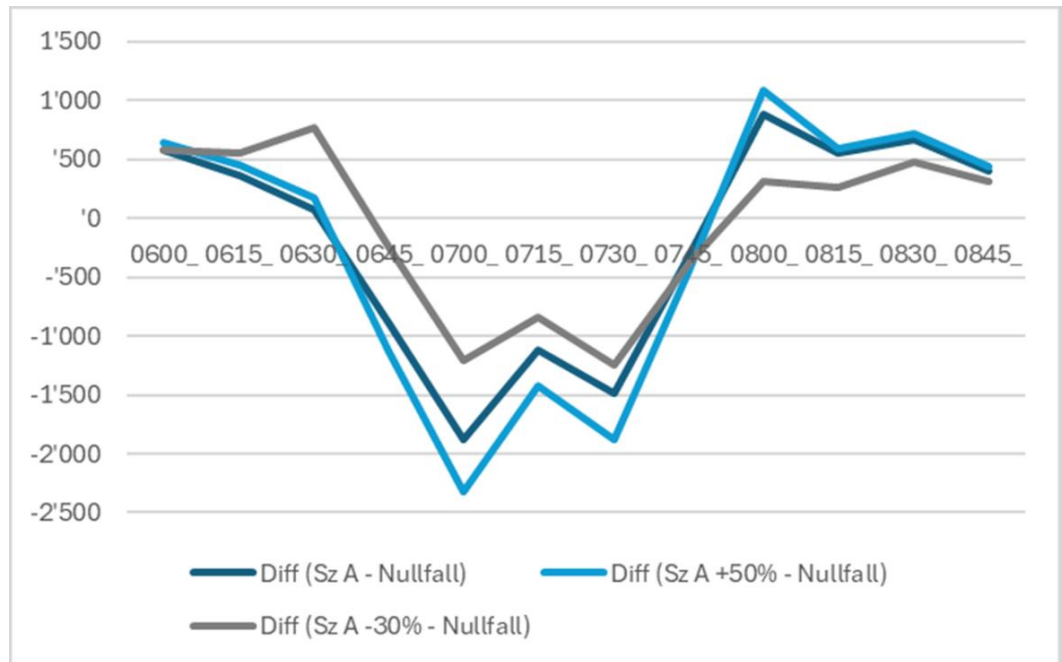


Abbildung 34: Absolute Veränderung der PW-Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall

Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt die relative Veränderung inkl. der Berechnung konstanter Nachfrage (OF für Nullfall) nur mit Umlegung und Abfahrtszeitwahl.

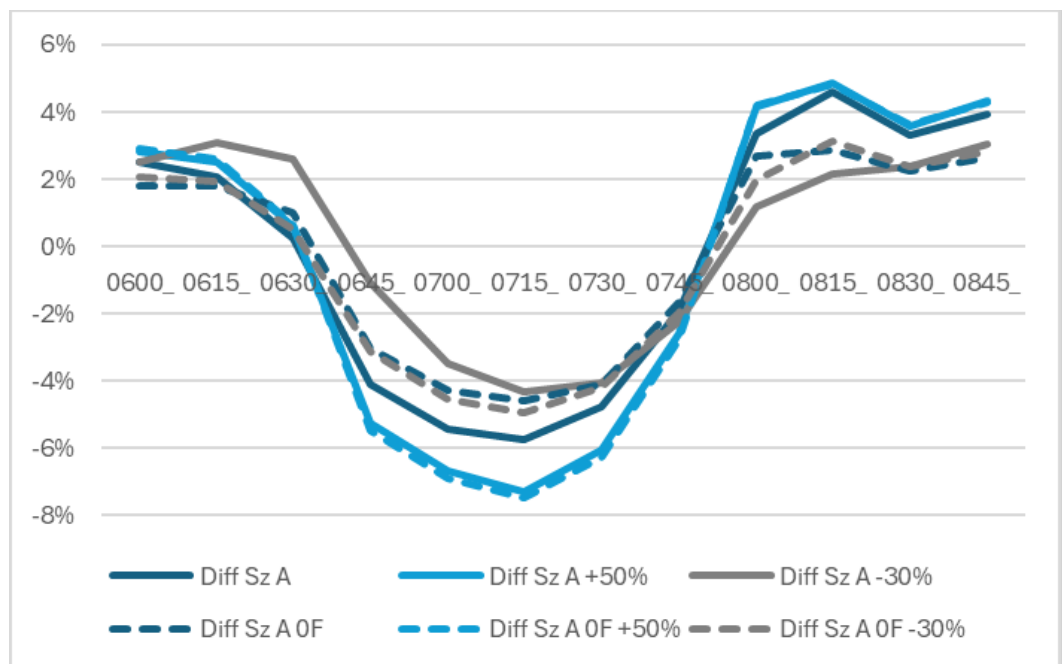


Abbildung 35: Relative Veränderung der PW Nachfrage-Differenz mit Berücksichtigung der Modus- und Zielwahl (durchgezogene Linie) und konstanter Nachfrage (strichlierte Linie) zwischen Null- und Anwendungsfall

6.1.6 Sensitivitätsrechnungen TestszENARIO A: ÖV

Nachfolgend werden die Sensitivitäten (+50% und -30%) und das Grundszenario mit der Wirkung je Viertelstunde im betrachteten Zeitraum von 6 bis 9 Uhr gezeigt (Abbildung 36).

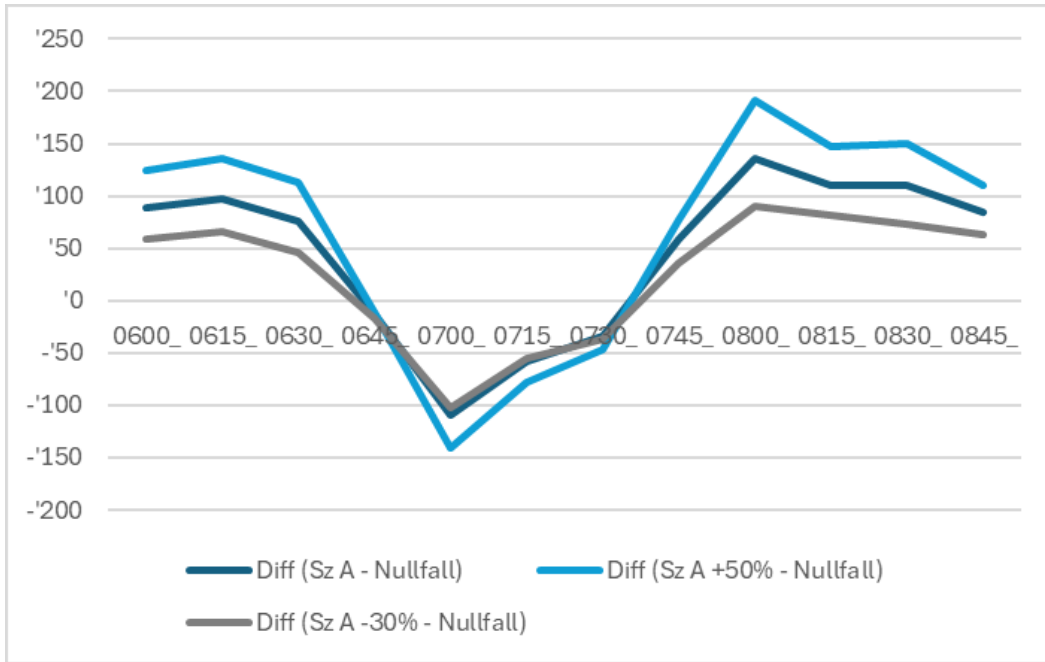


Abbildung 36: Absolute Veränderung der ÖV-Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall

Die nachfolgende Abbildung 37 zeigt die relative Veränderung und der Berechnung mit konstanter Nachfrage nur mit Umlegung und Abfahrtszeitwahl.

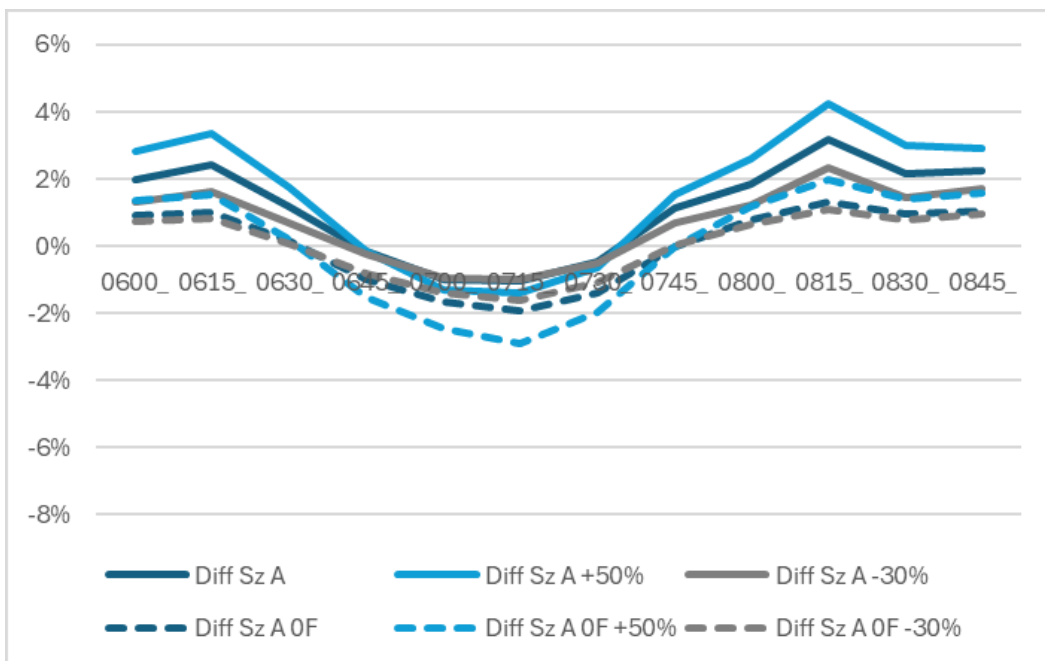


Abbildung 37: Relative Veränderung der ÖV Nachfrage-Differenz mit Berücksichtigung der Modus- und Zielwahl (durchgezogene Linie) und konstanter Nachfrage (strichlierte Linie) zwischen Null- und Anwendungsfall

6.2 Testscenario B

6.2.1 Definition Testscenario B

Testscenario B wird im GVM Luzern inklusive einer EVA-Nachfrageberechnung (Ziel- und Moduswahl) durchgeführt. Angenommen wird ein km-basiertes Gebietspricing innerhalb Stadt und Agglomeration Luzern (siehe Abbildung 38, inkl. Autobahn A2) von 7-8 Uhr mit der Bepreisung von 10 Rp pro P-km im ÖV und 13.4 Rp pro PW-km für den PW-Verkehr. Unter Berücksichtigung des Besetzungsgrades im PW-Verkehr beträgt der Preis je P-km sowohl im ÖV als auch beim PW 10Rp innerhalb des Pricing-gebiets von 7-8 Uhr.



Abbildung 38: Übersicht: Agglomeration Luzern

Im MIV-Modell wird zur Abbildung einer km-abhängigen Maut das befristete Streckenattribut der IV-Maut für PW aus der Multiplikation von Streckenlänge und der vorgegebenen Rp pro km zeitscheibenfein gesetzt. Aufgrund begrenzter Nachkommastellen (max. 2) in den befristeten Attributen und teilweise sehr kurzen Streckenlängen entstehen für viele Strecken Nullwerte. Deshalb erfolgt als Korrektur eine temporäre Gewichtung der Mautwerte mit einem gewählten Faktor 1000.

Widerstand für Verkehrssystem PW (Strecken)			
Anzahl: 2	Koeffizient	Attribut	Op.
1	1.000000	tAkt-IVSys(PW)	...
2	0.000050	Maut-IVSys(PW)	...

Abbildung 39: Einstellungen im Routenwahlwiderstand

Dieser wird im Nachgang wieder über entsprechende Anpassungen im Koeffizienten der Maut im Routenwahlwiderstand (siehe Abbildung 39) und über einen Korrekturverfahrensschritt in der IV-Kenngrößenmatrix Maut herausgerechnet (siehe Abbildung 40).

```

Formel für Matrix bearbeiten

Definieren Sie eine Ergebnismatrix. Existierende Matrizen werden überschrieben.
Beispiel: Matrix([Nr]=1) := Matrix([Nr]=2) * Matrix([Nr]=3)
Weitere Beispiele
Matrix([NR] = 19) := Matrix([NR] = 19) / 1000

```

Abbildung 40: Verfahrensschritt zur Korrektur der temporären Gewichtung bei km-Pricing

Die ÖV-Kurse innerhalb des Agglomerations- und Stadtgebiets zwischen 7-8 Uhr wurden mit 10 Rp pro km attribuiert. Nachfolgend sind die Anzahl Kurse mit Preiszuschlägen je konzessioniertes Transportunternehmen (KTU) aufgeführt:

- VBL 291
- Rottal Auto AG 4
- AutoAG 56
- Postauto AG 16
- AAGS 3
- RV Bahn 34

6.2.2 Gesamtnachfrageveränderung: Testszenario B

Die nachfolgenden Tabelle 6 zeigt die Gesamtnachfrageveränderung über einen Werktag. Wie auch schon im Testszenario A wurden die Kenngrößen für Fuss und Velo konstant gehalten, aber durch die kürzeren PW-Fahrzeiten unter Belastung haben sich die Angebotsverhältnisse zu Gunsten des PW verschoben, und dadurch gewinnt er Marktanteile.

TestszENARIO B: Ergebnis Nachfrage DWV				
Modus	Nullfall	Sz B (10Rp/Pkm)	SzB-Null	Rel SzB-Null
Fuss	523'032	521'847	-1'185	-0,23%
Velo	201'312	200'498	-814	-0,40%
PW-Wege	1'151'401	1'155'266	3'865	0,34%
PW-Fahrten	885'664	888'784	3'120	0,35%
ÖV	244'043	242'178	-1'866	-0,76%
plus 50%		Sz B (15Rp/Pkm)		
Fuss	523'032	521'742	-1'185	-0,25%
Velo	201'312	200'665	-814	-0,32%
PW-Wege	1'151'401	1'156'226	3'865	0,42%
PW-Fahrten	885'664	889'577	3'913	0,44%
ÖV	244'043	241'155	-2'888	-1,18%
minus 30%		Sz B (7Rp/Pkm)		
Fuss	523'032	520'870	-2'163	-0,41%
Velo	201'312	200'010	-1'302	-0,65%
PW-Wege	1'151'401	1'157'617	6'216	0,54%
PW-Fahrten	885'664	890'666	5'003	0,56%
ÖV	244'043	241'291	-2'752	-1,13%

Tabelle 6: TestszENARIO B: Ergebnis Nachfrage DWV

6.2.3 Auswertung TestszENARIO B: PW

Die Auswertung des Szenario B zeigt für PW eine Abnahme der Nachfrage im Anwendungsfall für den Zeitraum von 06:45-7:45 Uhr (siehe Abbildung 41). In den anderen betrachteten Zeiträumen (06:00–06:45 Uhr und 7:45–09:00 Uhr) ist hingegen eine Zunahme der PW-Nachfrage zu verzeichnen. Erwartungsgemäss ist dieses Verhalten sowohl in der korrigierten Nachfrage als auch in der unkorrigierten Nachfrage zu erkennen.

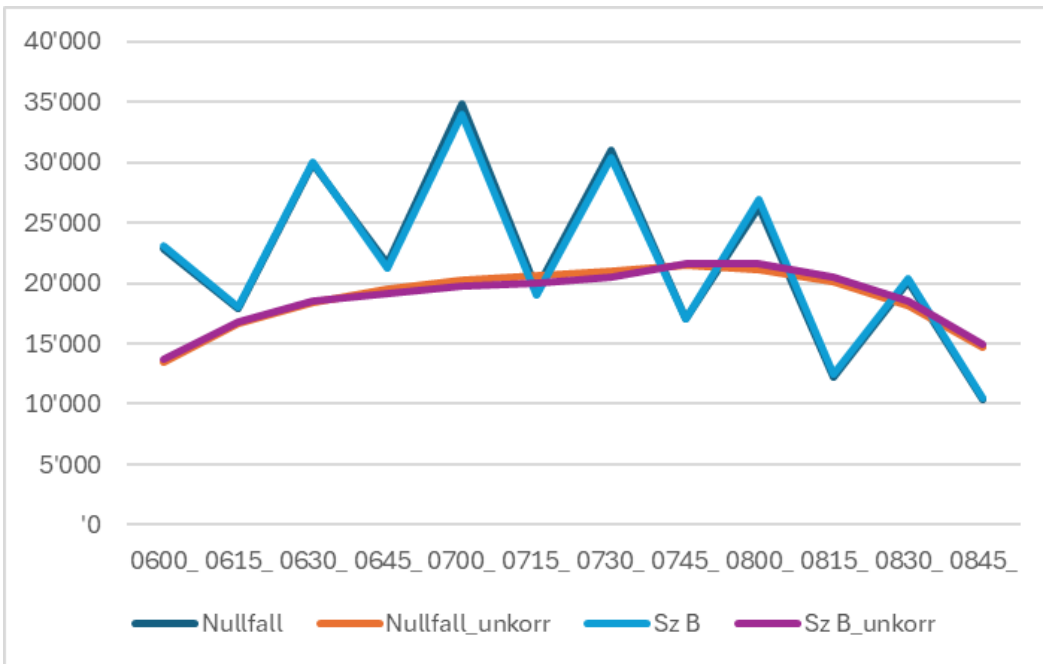


Abbildung 41: Veränderung der PW-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die Nachfragedifferenz zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum ist detailliert in Abbildung 42 dargestellt. Dabei zeigt sich eine weniger deutliche Verschiebung der PW-Nachfrage vor und nach der Pricing Periode von 7-8 Uhr gegenüber dem Szenario A.

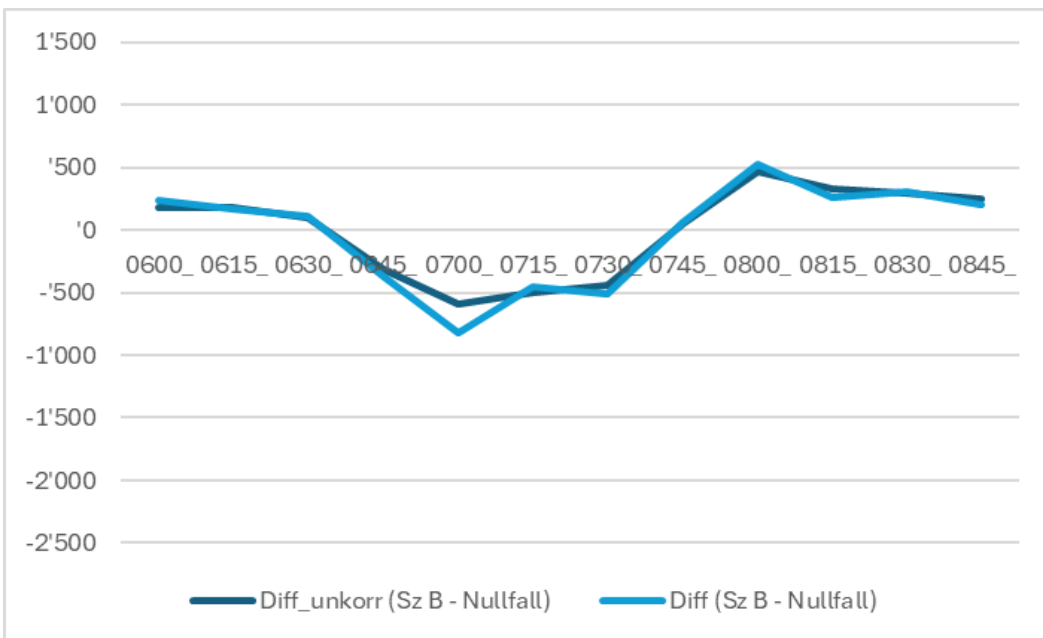


Abbildung 42: Veränderung der PW-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die Differenzen der Kenngrößen Distanz und T_{akt} zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum sind in Abbildung 43 dargestellt. Sie zeigen sich im Einklang mit den getroffenen Massnahmen und den ermittelten Nachfragedifferenzen.

Die Kenngrösse T_{akt} nimmt im Zeitraum vor 07:45 erwartbar durch die Verringerung der Auslastung ab. Auch ist der Effekt vor- und nachlaufender Wege deutlich erkennbar, d.h. auch Wege beginnend vor 07:00 Uhr können im Schnitt von der geringeren Auslastung profitieren. Die Kenngrösse Distanz zeigt über den gesamten betrachteten Zeitraum eine leichte Zunahme, da aufgrund des Gebietspricing Umwege gewählt werden.

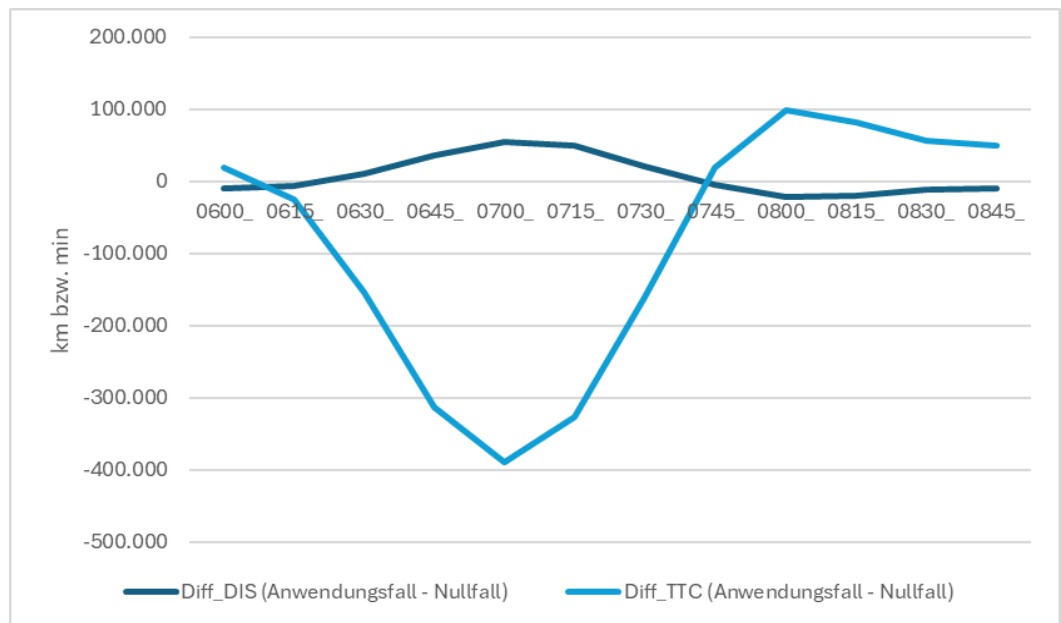


Abbildung 43: Veränderung der KG-Differenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen der Distanz und von T_{Akt}) zwischen Null- und Anwendungsfall

6.2.4 Auswertung Testscenario B: ÖV

Die Auswertung des Szenario B zeigt für den ÖV eine leichte Abnahme der Nachfrage im Anwendungsfall für den Zeitraum von 06:45–7:45 Uhr (siehe Abbildung 44). In den anderen betrachteten Zeiträumen (06:00–06:45 Uhr und 7:45–09:00 Uhr) ist hingegen eine Zunahme der ÖV-Nachfrage zu verzeichnen. Erwartungsgemäss ist dieses Verhalten sowohl in der korrigierten Nachfrage als auch in der unkorrigierten Nachfrage zu erkennen.

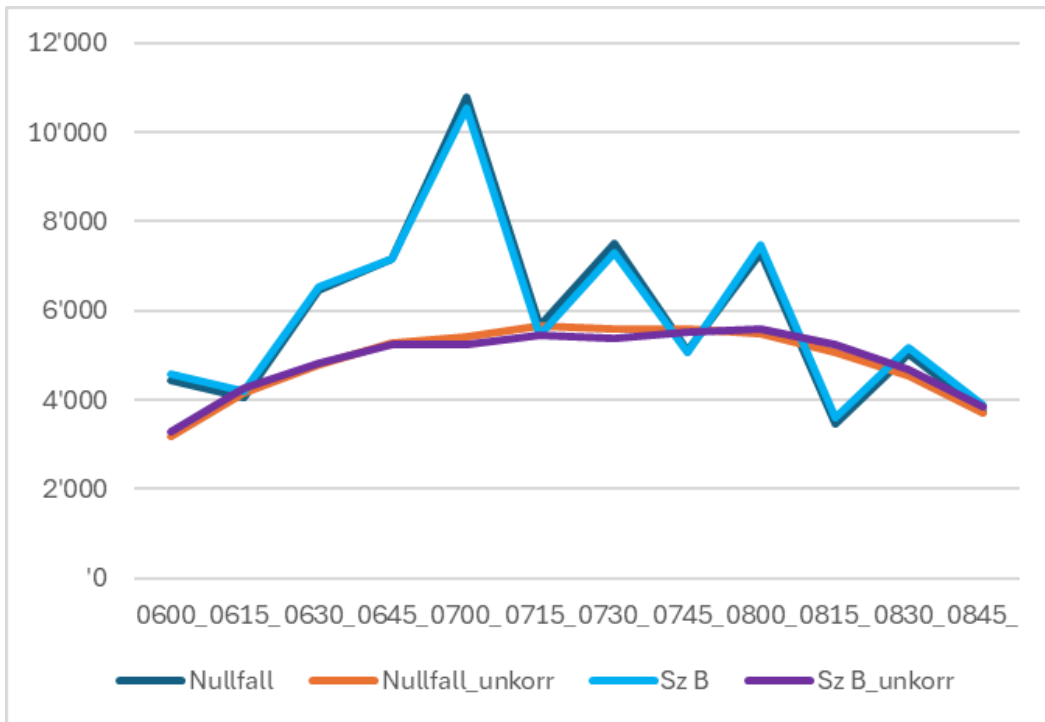


Abbildung 44: Veränderung der ÖV-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die ÖV-Nachfragedifferenz zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum ist detailliert in Abbildung 45 dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich eine Verschiebung der ÖV-Nachfrage vor und nach der Pricing Periode von 7-8 Uhr.

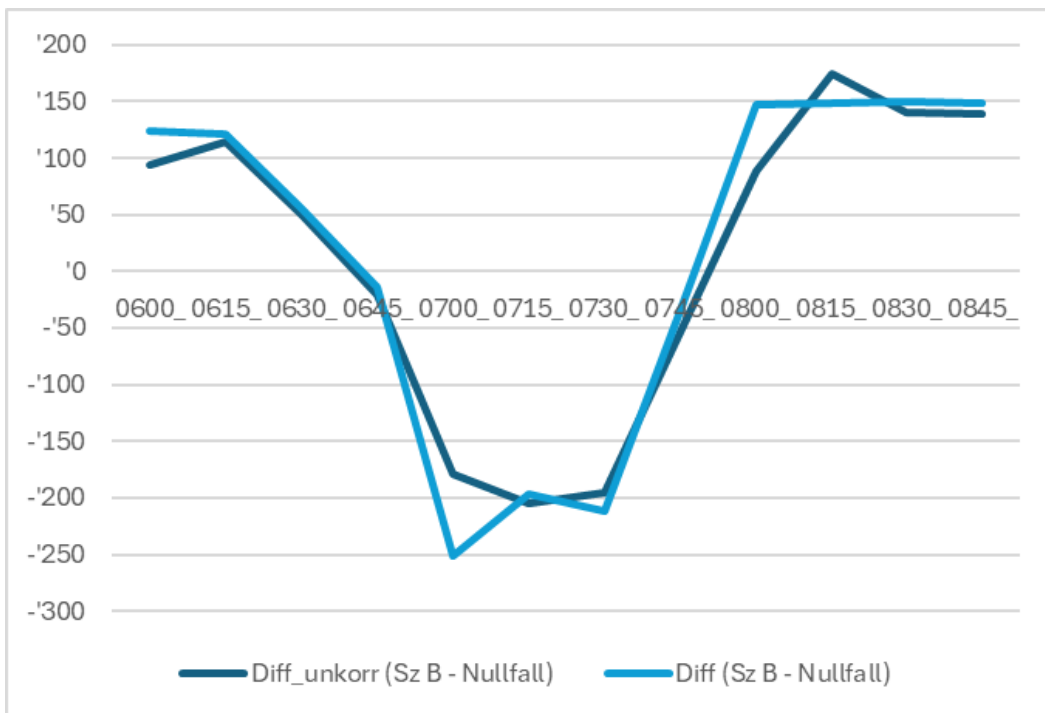


Abbildung 45: Veränderung der PW-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

6.2.5 Sensitivitätsrechnungen TestszENARIO B: PW

Nachfolgend werden die Sensitivitäten (+50% und -30%) und das Grundszenario mit der Wirkung je Viertelstunde im betrachteten Zeitraum von 6 bis 9 Uhr verglichen. In Abbildung 46 sind die absoluten Veränderungen für TestszENARIO B dargestellt.

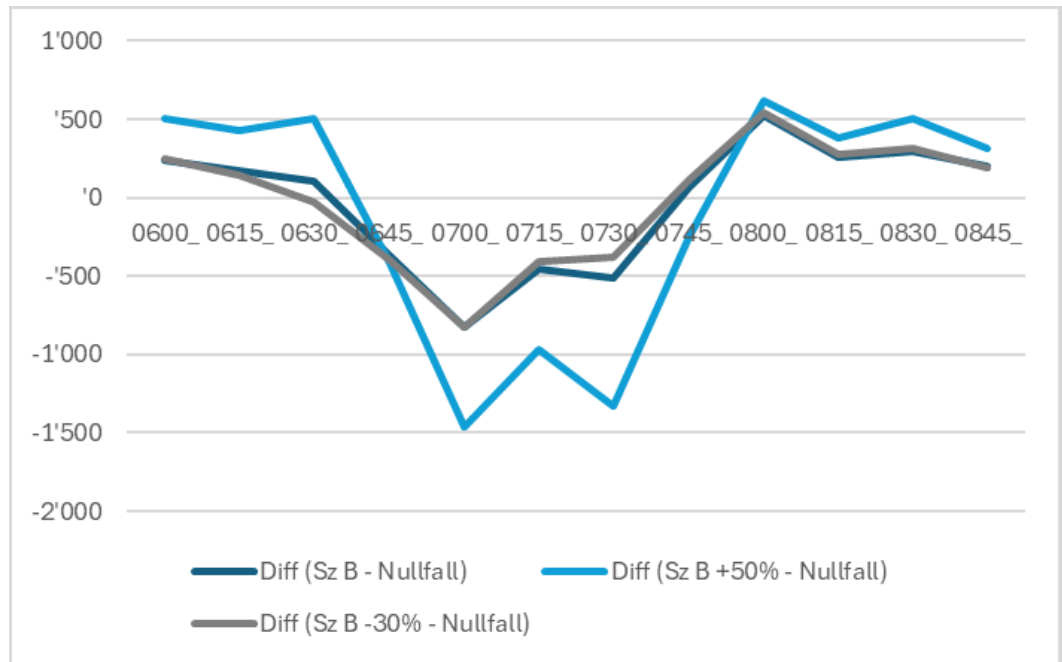


Abbildung 46: Absolute Veränderung der PW-Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall

Die nachfolgende Abbildung 47 zeigt die relative Veränderung inkl. der Berechnung konstanter Nachfrage (oF für Nullfall) nur mit Umlegung und Abfahrtszeitwahl.

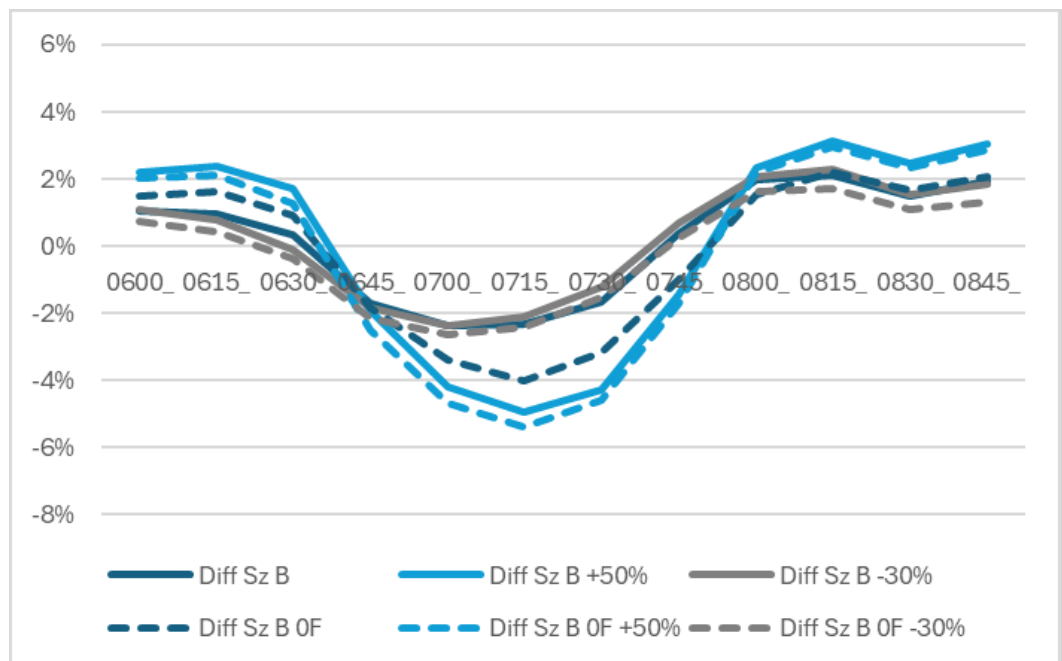


Abbildung 47: Relative Veränderung der PW Nachfrage-Differenz mit Berücksichtigung der Modus- und Zielwahl (durchgezogene Linie) und konstanter Nachfrage (strichlierte Linie) zwischen Null- und Anwendungsfall.

6.2.6 Sensitivitätsrechnungen Testszenario B: ÖV

Nachfolgende Abbildung 48 zeigt die Sensitivitäten (+50% und -30%) und das Grundscenario mit der Wirkung je Viertelstunde im betrachteten Zeitraum von 6 bis 9 Uhr.

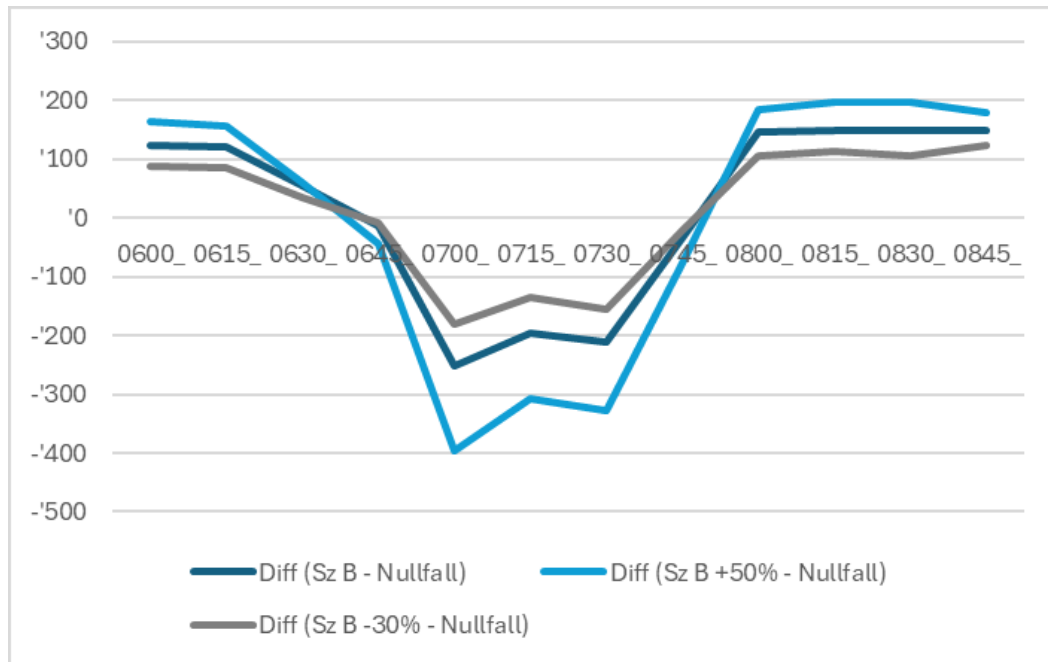


Abbildung 48: Absolute Veränderung der ÖV-Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall

Die nachfolgende Abbildung 49 zeigt die relative Veränderung inkl. der Berechnung konstanter Nachfrage nur mit Umlegung und Abfahrtszeitwahl (Nullfall oF) im Vergleich zur Berechnung mit Ziel- und Moduswahl. Hier zeigt sich eine leichte Verschiebung von ÖV-Wege aus dem Analysezeitraum von 6 bis 9 Uhr im Nullfall, welche zu einer kleinen Abnahme der Wege im Nullfall des Szenarios A +50% (Diff Sz. A oF +50%) führt. Dies wird wahrscheinlich auch durch die recht kleine Anzahl an absoluten Wegen beeinflusst.

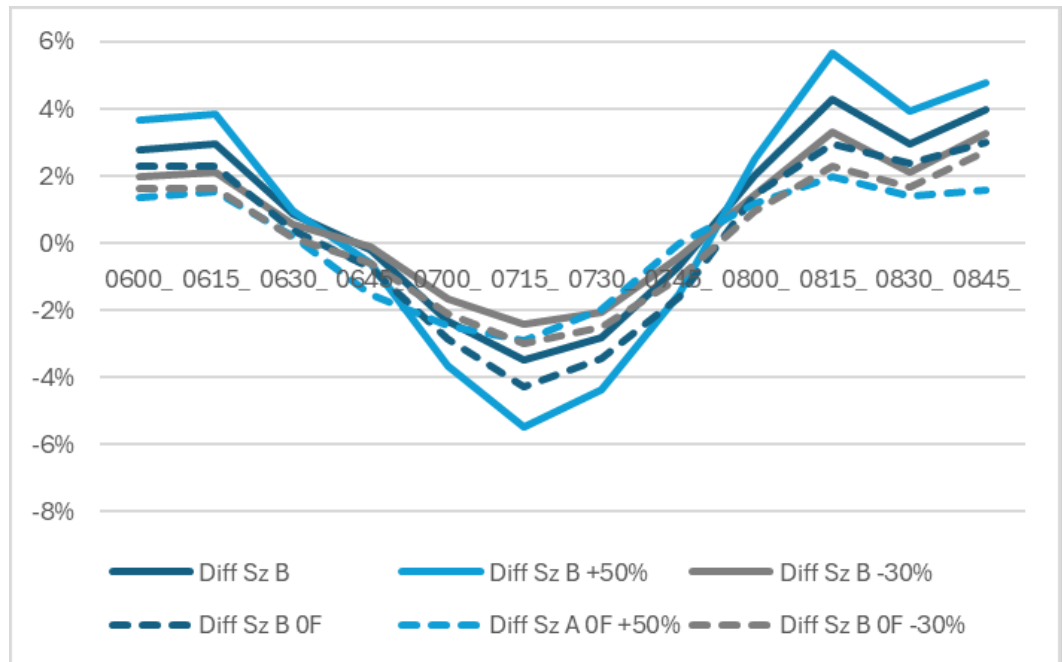


Abbildung 49: Relative Veränderung der ÖV Nachfrage-Differenz mit Berücksichtigung der Modus- und Zielwahl (durchgezogene Linie) und konstanter Nachfrage (Nullfall OF, strichlierte Linie) zwischen Null- und Anwendungsfall

6.3 Testscenario C

Das Testscenario C wird im NPVM ohne Berücksichtigung einer EVA-Nachfrageberechnung (Ziel- und Moduswahl), sondern unter ausschliesslicher Betrachtung der Routen- und Abfahrtszeitwahl durchgeführt. Als Grundlage werden die NPVM-Umlegungsversionen «2023_MIV_007_ohneZD_20240902» und «2023_OEV_005_ohneZD_20240902» (Stand Ende August 2024) verwendet.

Die Modellparametrisierung wird dabei grundlegend beibehalten bzw. zuvor durch den bestehenden Verfahrensablauf gesetzt (z.B. Werte für Anbindungen). Anschliessend werden die in Kapitel 5 beschriebenen Anpassungen vorgenommen. Die Nachfragematrixganglinie des Nullfalls wurde im Projekt «Etablierung NPVM 2017» (Vrtic et al., 2020b) berechnet und hier in den Netzmodellzustand 2023 eingelesen.

Die Rechenzeiten bei einer Rechnerleistung von 64 Kernen und 256 GB Arbeitsspeicher sowie die Dateigrössen (ohne Umlegungsergebnis) gestalten sich im NPVM-Testscenario C wie folgt:

Rechenzeiten und Dateigrössen im Szenario C		
Version	Rechenzeit	Dateigrösse
PW-Umlegung Nullfall	ca. 16 Std. (bei Gap 10^{-4})	ca. 52 GB
PW-Umlegung Anwendungsfall	ca. 16 Std. je Rückkopplung 3 (bei Gap 10^{-3})	ca. 60 GB
ÖW-Umlegung Nullfall	ca. 15 Std.	ca. 38 GB
ÖW-Umlegung Anwendungsfall	ca. 15 Std. je Rückkopplung 3	ca. 43 GB

Tabelle 7: Übersicht der Rechenzeiten und Dateigrössen im Szenario C

Zu beachten ist, dass bei einem grösser gewählten betrachteten Zeitraum und einer weitergefassten zulässigen Verschiebungszeit deutlich andere Rechenzeiten entstehen können. Insgesamt liegt das NPVM aufgrund seiner Modellgrösse mit der vorliegenden Rechnerleistung im rechentechnischen Grenzbereich. Im Zuge der Szenario-Berechnungen sind in diesem Zusammenhang zwar Massnahmen ergriffen worden, um den Arbeitsspeicherbedarf der verwendeten Skripte im Verfahrensablauf möglichst zu reduzieren, dennoch können hier bei anders gewählten Rahmenbedingungen die Rechenkapazitäten überschritten werden.

6.3.1 Definition Testscenario C

Für das PW-Szenario wird eine zusätzliche Streckenkapazität auf mehrspurigen Autobahnen und -strasse zwischen 7-8 Uhr durch eine mögliche Pannestreifenutzung (Annahme: Plus einen Fahrstreifen 950 Fz/h bzw. 230 Fz/15min) angenommen. Die Pannestreifenutzung ist dabei vereinfacht und konkret auf den in Abbildung 50 dargestellten Abschnitten erlaubt.

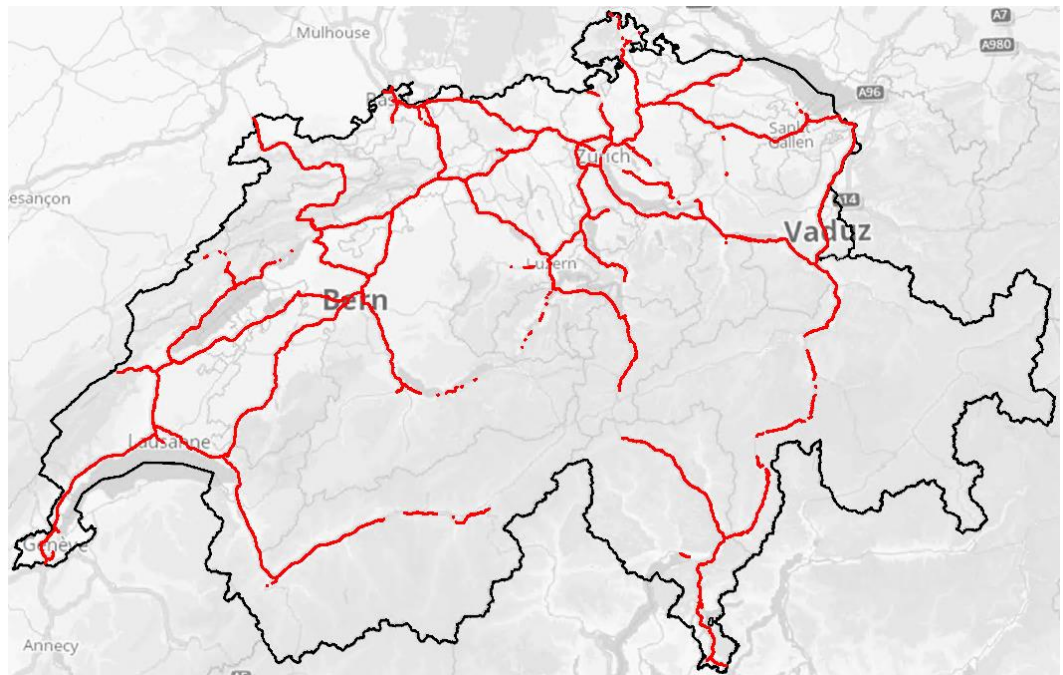


Abbildung 50: Übersicht des Streckennetzes mit zusätzlicher IV-Kapazität

Modelltechnisch wird die zusätzliche Streckenkapazität in einem angelegten befristeten Streckenattribut «Kapazität IV» hinterlegt (siehe Abbildung 51). Im Verfahrensablauf der MIV-Umlegung wird diese Zusatzkapazität dann jeweils je zeitscheibenfeiner Berechnung der Umlegung auf die bestehenden 15min-Kapazität addiert.

KapIV_TV
<pre><TempAtt AddVal="0" EndDayIndex="1" EndTime="08:00:00" Name="PFreigabe" Periodic="0" StartDayIndex="1" StartTime="07:00:00" Value="230"/><TempAtt AddVal="0" EndDayIndex="2" EndTime="00:00:00" Name="PFreigabe" Periodic="0" StartDayIndex="1" StartTime="00:00:00" Value="0"/></pre>

Abbildung 51: Festlegung des befristeten Attributs «Kapazität IV»

Im ÖV wird eine Verdoppelung der Verdichtungskurse für Kategorie C und D (HVZV und HVZE) im Regionalverkehr der Bahn in der gesamten Schweiz angenommen. Die Definition der Verdichtungskurse in der Hauptverkehrszeit (HVZ) stammt aus dem SBB-Systemfahrplan, welcher im NPVM hinterlegt ist. Durch die Kopie dieser Linien, bleiben die Beförderungszeit, Intervall, Anzahl Umsteigen etc. konstant, aber die ÖV-Kapazität im Regionalverkehr erhöht (meist verdoppelt) sich. In Abbildung 52 ist die relative Veränderung der ÖV-Kapazität in der Zeitscheibe 7.00-7.15 aufgeführt.

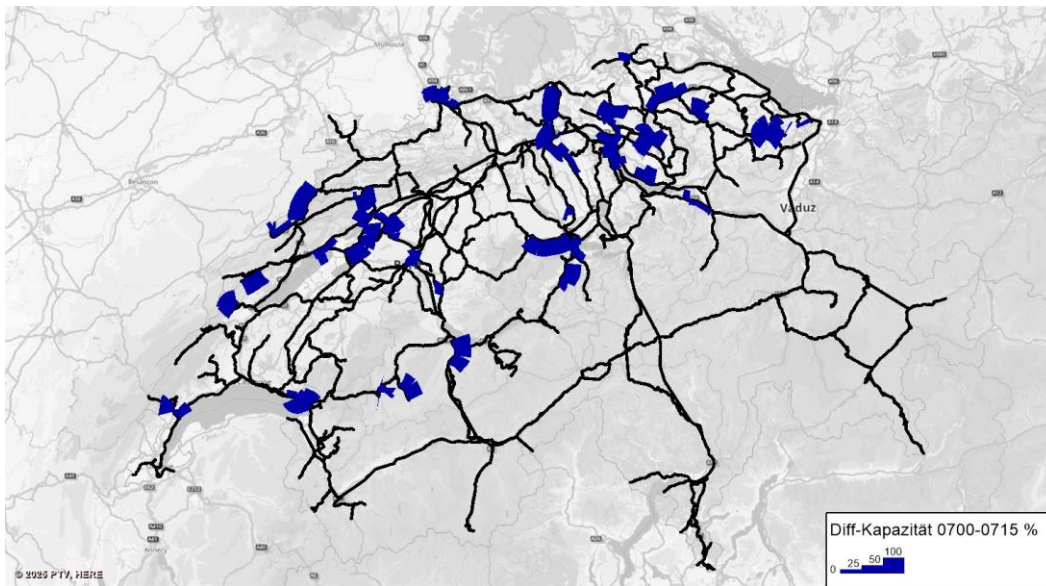


Abbildung 52: Relative Differenz in der ÖV-Kapazität dargestellt als Streckensumme in der Zeitscheibe 7.00-7.15 Uhr

6.3.2 Auswertung Testszenario C: PW

Die Auswertung des Szenario C zeigt für PW eine Zunahme der Nachfrage im Anwendungsfall für den Zeitraum von 06:30-7:45 Uhr (siehe Abbildung 53). In den anderen betrachteten Zeiträumen (06:00–06:30 Uhr und 7:45–09:00 Uhr) ist hingegen eine Abnahme der PW-Nachfrage zu verzeichnen. Erwartungsgemäss ist dieses Verhalten sowohl in der korrigierten Nachfrage als auch in der unkorrigierten Nachfrage zu erkennen. Erkennbar ist zudem der Einfluss vor- und nachlaufender Wege, d.h. bereits früher beginnende Wege profitieren von der Kapazitätserhöhung bzw. spät während der Kapazitätserhöhung beginnende Wege profitieren weniger. Konkret auf den Zeitraum von 7:00-8:00 Uhr bezogen wächst die PW-Nachfrage insgesamt um +1.2%.

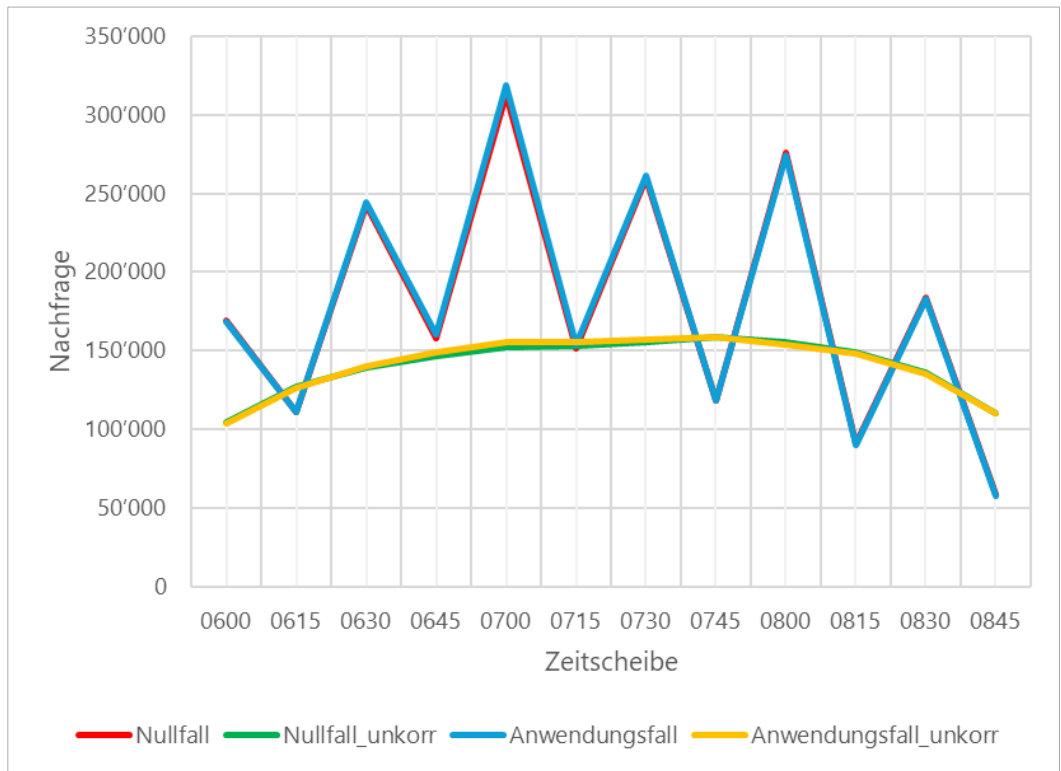


Abbildung 53: Veränderung der PW-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die Nachfragedifferenz zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum ist detailliert in Abbildung 54 dargestellt. Dabei ist eindeutig ein «Peak» der Zunahme um 07:00 Uhr zu erkennen, wohingegen um 08:00 Uhr, also kurz nach Rücknahme der Kapazitätserhöhung, die grösste Abnahme zu verzeichnen ist.

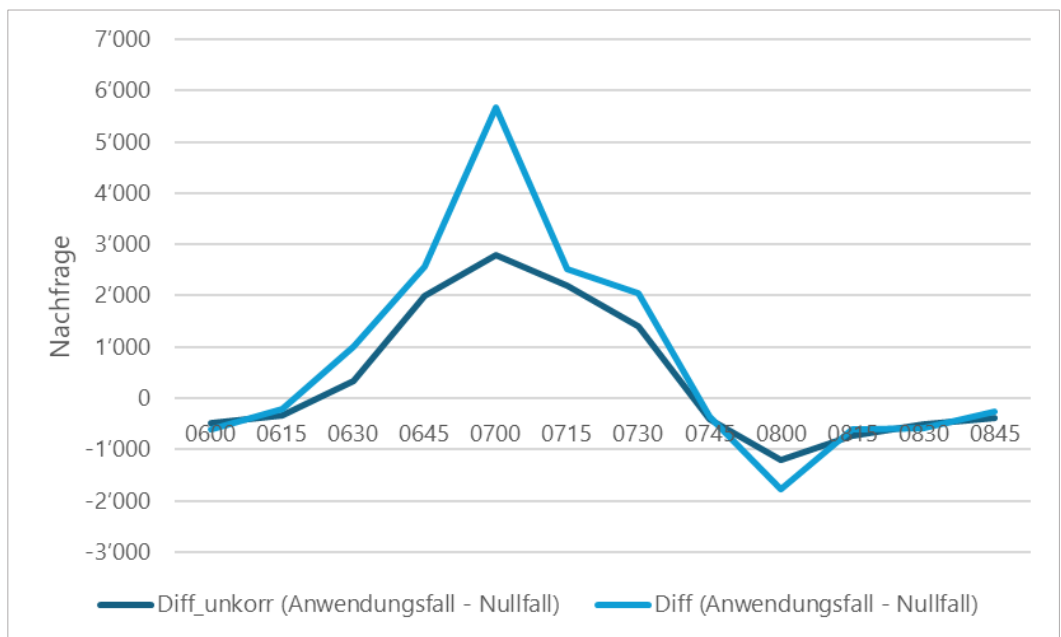


Abbildung 54: Veränderung der PW-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die Differenzen der Kenngrößen Distanz und T_{akt} zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum sind in Abbildung 55 dargestellt. Sie zeigen sich im Einklang mit den getroffenen Massnahmen und den ermittelten Nachfragedifferenzen. Die Kenngrösse T_{akt} nimmt im Zeitraum vor 07:45 erwartbar durch die Kapazitätserhöhung ab. Auch ist der Effekt vor- und nachlaufender Wege deutlich erkennbar, d.h. auch Wege beginnend vor 07:00 Uhr können im Schnitt von den Kapazitätserhöhungen profitieren. Die Kenngrösse Distanz zeigt über den gesamten betrachteten Zeitraum eine leichte Zunahme, da aufgrund der Kapazitätserhöhung distanztechnisch längere Wege gewählt werden können.

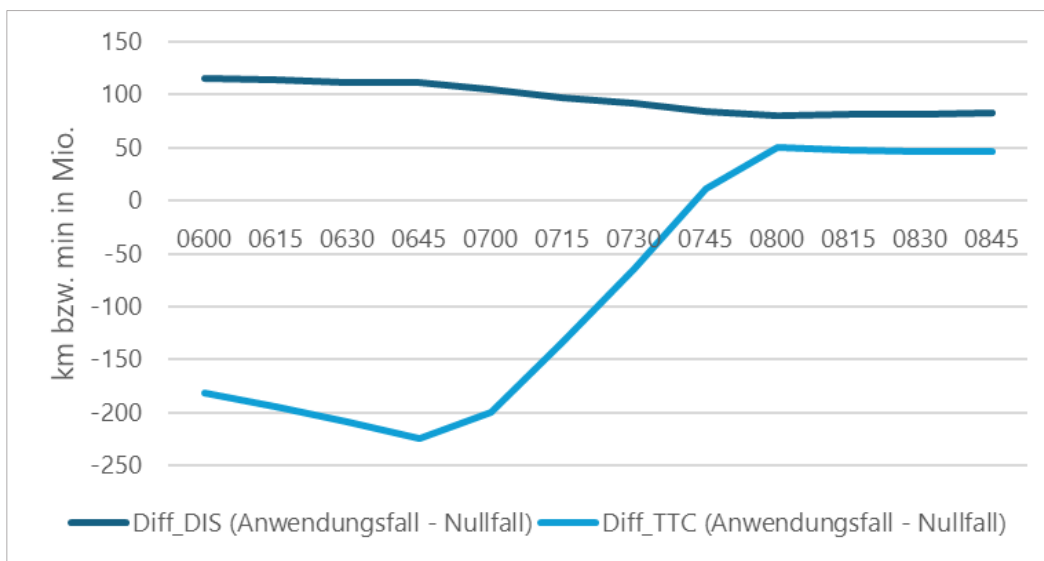


Abbildung 55: Veränderung der KG-Differenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen der Distanz und von T_{Akt}) zwischen Null- und Anwendungsfall

Insgesamt liegen die Ergebnisse des PW-Szenarios in einem nachvollziehbaren Bereich.

6.3.3 Auswertung Testszenario C: ÖV

Die Auswertung des Szenario C zeigt für den ÖV eine gleichbleibende zeitscheibenfeine Nachfrage zwischen Null- und Anwendungsfall für den gesamten betrachteten Zeitraum von 06:00-9:00 Uhr (siehe Abbildung 56). Erwartungsgemäss ist dieses Verhalten sowohl in der korrigierten Nachfrage als auch in der unkorrigierten Nachfrage zu erkennen. Konkret auf den Zeitraum von 7:00-8:00 Uhr bezogen wächst die ÖV-Nachfrage insgesamt minimal um +0.03%.

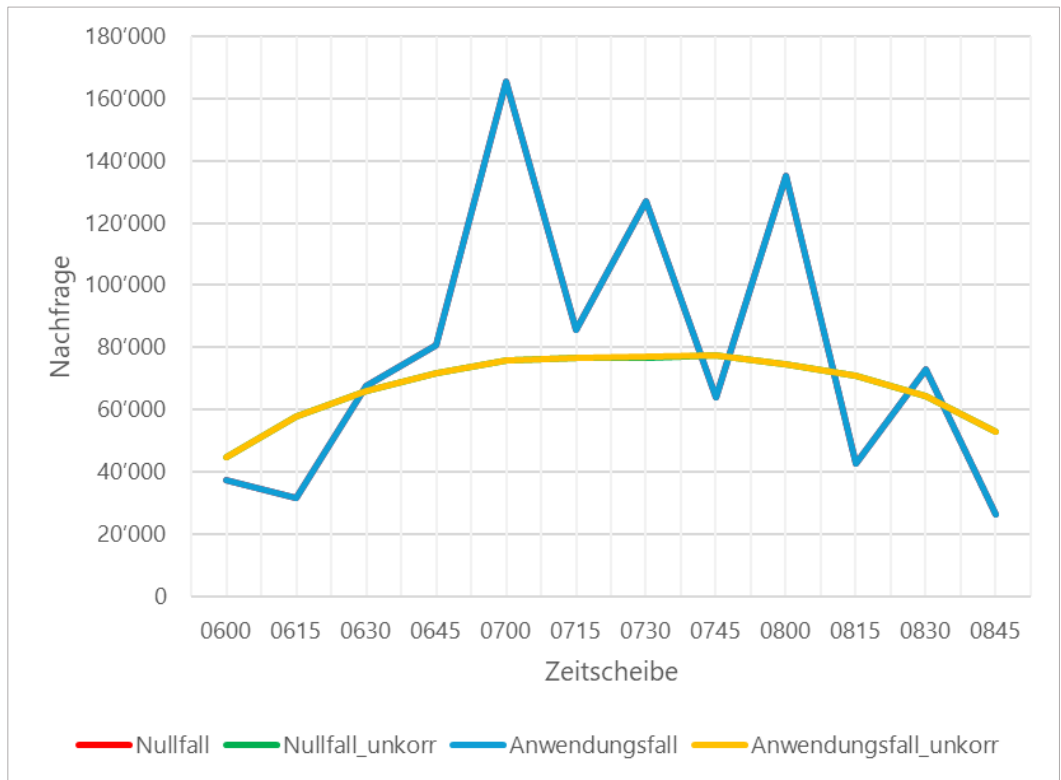


Abbildung 56: Veränderung der ÖV-Nachfrage (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall

Die Nachfragedifferenz zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum ist detailliert in Abbildung 57 dargestellt. Dabei ist es aufgrund der minimalen Nachfrageänderung nicht möglich eine eindeutige Tendenz hinsichtlich Zu- und Abnahmeeffekten abzuleiten.

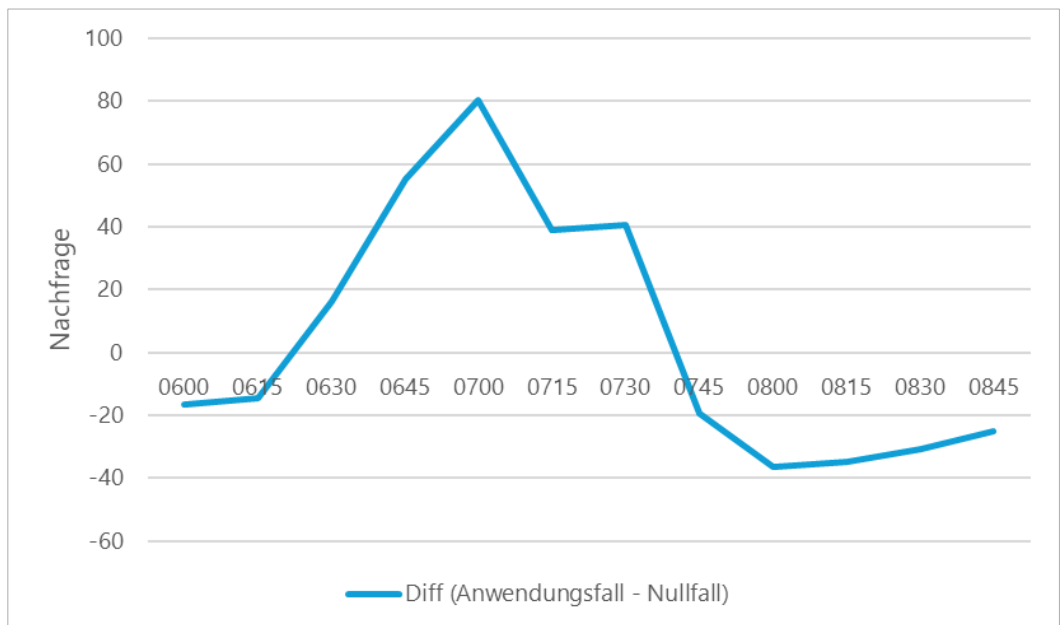


Abbildung 57: Veränderung der ÖV-Nachfragedifferenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen) zwischen Null- und Anwendungsfall.

Die Differenzen der Kenngrößen Umsteigehäufigkeit und ÖV-Auslastung zwischen Null- und Anwendungsfall über den betrachteten Zeitraum sind in Abbildung 58 dargestellt. Die Kenngrösse Umsteigehäufigkeit zeigt erwartungsgemäss eine leichte Zunahme über den Zeitraum 06:30-07:15 Uhr. Für die Kenngrösse ÖV-Auslastung zeigt sich insgesamt eine Abnahme, erwartungsgemäss insbesondere im Zeitraum 06:30-07:45 Uhr, wo die Kapazitätserweiterung durch die Verdopplung der Verdichtungskurse am meisten wirkt.

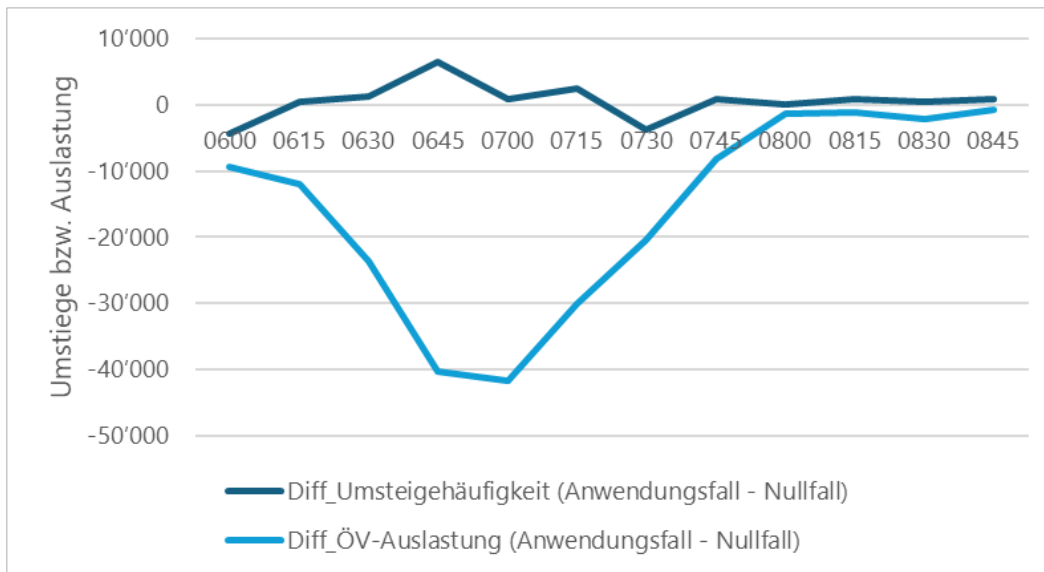


Abbildung 58: Veränderung der KG-Differenz (zeitscheibenfeine Matrixsummen der Umsteigehäufigkeit und ÖV-Auslastung) zwischen Null- und Anwendungsfall

Als mögliche Gründe für eine fehlende relevante Nachfrageänderung im ÖV-Szenario sind einige Aspekte zu nennen, die u.a. auch mit dem bestehenden Aufbau des NPVM in Zusammenhang stehen. Zum einen wird die ÖV-Auslastung im Gegensatz zu möglichen Pricing- oder Kapazitätserhöhungen für PW nicht in der Routenwahl mitberücksichtigt. Daher erfolgt keine Reaktion bei der Routenwahl im Szenario C.

Zum anderen sind im NPVM bisher keine Bus- oder Tram-Kapazitäten, sondern nur Bahn-Kapazitäten hinterlegt. Der ÖV-Auslastungswert fällt deshalb auf Relationsebene schon im Nullfall tendenziell sehr niedrig aus, da für ÖV-Teilwege in Bus und Tram ein Auslastungswert von Null wirkt. Die für die Abfahrtszeitwahl relevanten Grenzen der Auslastungslevel (Kapitel 4.1) wurden zu Abmilderung dieses Effektes allerdings im entsprechenden Verfahrensschritt im NPVM um Zweidrittel reduziert.

Weiter findet die Verdopplung der Verdichtungskurse insbesondere in Bereichen statt, wo auch Aussenverkehre des Modells einen signifikanten Anteil der Nachfrage ausmachen. Diese bleiben aber grundsätzlich zum Nullfall unverändert, d.h. es findet hier keine Abfahrtszeitwahlreaktion statt. Ebenso sind die verkehrlichen Hauptachsen im Set der Verdichtungskurse unterrepräsentiert und die Kapazitätserhöhung betrifft vor allem Regionalverbindungen. Insbesondere auf diesen Relationen wirkt wiederum anteilig die obengenannte Problematik der fehlenden Bus- und Tram-Kapazitäten stärker.

7 Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Projekt wurde ein Ansatz zur Abbildung der Abfahrtszeitwahl in einem makroskopischen Verkehrsmodell entwickelt. Dieser Ansatz ermöglicht eine verhältnismässig einfache Ergänzung der Abbildung einer Abfahrtszeitwahl in bestehenden makroskopischen Modellen. Die Spezifizierung des Nutzens und die entsprechende Parameterschätzung zur Abbildung der zeitlichen Nachfrageverschiebung wurde empirisch fundiert auf Basis der SP-Befragung 2021 vorgenommen. Der Ansatz ist dabei aber nicht als «Plug and Play»-Ansatz zu betrachten. Für eine Anwendung in einem anderen regionalen oder kantonalen Kontext sind Anpassungen an den Verfahren notwendig sowie allenfalls auch eine eigenständige Schätzung von Verschiebe-Parametern aus der SP angezeigt.

Es existieren für den Ansatz sehr viele Einstellmöglichkeiten, welche neben dem möglichen Ergebnis auch grossen Einfluss auf das generelle «Handling» (Rechenzeiten, Dateigrössen etc.) haben. Gleichzeitig muss beachtet werden, dass die Komplexität des Modells auch inhaltlich deutlich zunimmt und mögliche Kalibrierungsarbeiten am Modell damit umfangreicher ausfallen. Im NPVM befindet sich der Ansatz beispielsweise mit einem betrachteten Zeitraum 6-9 Uhr und einer max. zulässigen Verschiebung von 1 Std. (bei 64 Kernen und 256 GB Arbeitsspeicher) rechentechnisch im Grenzbereich. Im GVM Luzern hingegen ist eine deutliche Ausdehnung des Zeitraums grundsätzlich gut möglich.

Eine Umstellung des entwickelten Ansatzes auf einen anderen Zeitraum (z.B. Abendspitzenstunde) ist möglich. Dazu sind die notwendigen zeitscheibenfeinen Matrizen (Nachfrage- und Kenngrössen) anzulegen sowie die Parameter in den Skripten im Verfahrensablauf anzupassen (u.a. «BEGINN» und «ENDE»).

Bei einer gleichzeitigen Ausdehnung des Zeitraums ist insbesondere in grösseren Modellen (z.B. NPVM) auf die rechentechnischen Kapazitätsgrenzen (Arbeitsspeicher etc.) zu achten. Diese können bei grösseren Modellen leicht überschritten werden.

Die gleichzeitige Betrachtung über einen längeren Zeitraum (z.B. inkl. Morgen- und Abendspitze) gestaltet sich rechentechnisch als schwieriger. Grundsätzlich ist in kleineren Modellen hier eine Ausweitung des betrachteten Zeitraums über beide Zeiträume (für MSP und ASP z.B. 6 bis 19 Uhr) denkbar und zu bevorzugen. Über die maximal zulässige zeitliche Verschiebung kann zudem die Interaktion zwischen den Zeiträumen in Bezug auf die Abfahrtszeitwahl festgelegt werden. Somit bleiben die Zeiträume diesbezüglich getrennt und werden nur in Bezug auf die tagesfeinen Kenngrössen gemeinsam betrachtet. Ansonsten, d.h. in grösseren Modellen wie dem NPVM, müssen die beiden Zeiträume hier in getrennten Umlegungsmodellen gerechnet und für eine Nutzung im Nachfragemodell anschliessend manuell vereinigt werden (also die zeitscheibenfeinen KGs hoch- und die zeitscheibenfeine Nachfrage runtergerechnet werden).

Im Rahmen des Projekts wurde zudem ein eigener Ansatz zur Berechnung der dynamischen IV-Umlegung entwickelt. Dies geschah vor dem Hintergrund der fehlenden Eignung bestehender dynamischer Umlegungsverfahren in VISUM 2024. Der Ansatz sieht dabei die Verwendung einzelner zeitscheibenfeiner statischer IV-Gleichgewichtsumlegungen vor, wobei jeweils anteilig die vor- und nachlaufenden Wege aus anderen Zeitscheiben berücksichtigt werden. Die zusätzlich notwendigen Rückkopplungsmechanismen und Konvergenzprüfungen wurden in VISUM 2024 skriptbasiert ergänzt und laufen automatisiert ab. Solange softwareseitig keine dynamischen Umlegungsverfahren verfügbar sind, bietet der im Projekt entwickelte Ansatz eine valide und praktikable Alternative.

In Bezug auf die Ergebnisse der Testszenarien im GVM Luzern sind für eine Anwendung in der Praxis zusätzliche Kalibrationsarbeiten im Nachfragemodell notwendig. Dies betrifft insbesondere die Bewertung von T_{akt} beim PW in der EVA-Nachfrageberechnung, da sich die tagesfeine T_{akt} aufgrund der möglichen zeitlichen Verschiebung der Nachfrage im Sinne einer Glättung entsprechend reduzieren kann. Hier sollte der zeitliche Verschiebungswiderstand, welcher unter diesen Umständen neben einer niedrigeren T_{akt} im PW Verkehr wirkt, über angepasste Bewertungsparameter oder die Berücksichtigung einer entsprechenden weiteren Kenngrösse in die Bewertung miteinbezogen werden. Somit sollte die Beurteilung der belastungsabhängigen Fahrzeit T_{akt} in den verschiedenen Modellschritten konsistenter sein. Die Auslastung des ÖVs sollte ebenso schon im Basismodell in der Nachfrageberechnung berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung einer ÖV-Auslastungskenngrösse mit VISUM-internen Funktionen entwickelt. Um eine optimale Formulierung zur Berücksichtigung dieses Attributes im Nachfragemodell zu finden, sind allerdings noch weitergehende Tests und Analysen notwendig. Dies würde sich als eigenes Forschungsthema eignen.

Für die Erstellung von dynamischen Verkehrsmodellen mit Zeitscheiben von kleiner als eine Stunde, wie z.B. im gegenständlichen Projekt hier mit $\frac{1}{4}$ h feinen Scheiben, wären zudem feiner bzw. genauer aufgelöste Zähldatedaten auf der Strasse (ASTRA) und der Schiene (SBB) hilfreich.

Die dynamische Betrachtung des Verkehrsgeschehens ist sicherlich eine wichtige Perspektive für die Zukunft, um die Nachfrage und das Angebot realistischer abzubilden und eine umfassende Bewertung von Projekten zu ermöglichen. Insbesondere die Auswirkungen von Massnahmen, die auf eine ausgeglichene Verteilung der Verkehrsnachfrage zu Spitzenstunden abzielen, können mit dem entwickelten Ansatz präziser evaluiert werden. Der in diesem Projekt entwickelte Ansatz bietet sowohl methodisch wie auch hinsichtlich der notwendigen Parametrisierung umfangreiche Grundlagen hierfür.

Literaturverzeichnis

- Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2024). Analysis of the Stated Preference Survey 2021 on Mode, Route and Departure Time Choices, Research Report, Bern.
- Axhausen, K. W., A. Horni und K. Nagel (Hsg.) (2016). *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity Press.
- Ben-Akiva, M. und M. Bierlaire (2003). Discrete Choice Models with Applications to Departure Time and Route Choice. In: Hall, R.W. (Hsg.) *Handbook of Transportation Science*. International Series in Operations Research & Management Science, Band 56, 7-37, Springer.
- Daly, A., J. Fox und J. G. Tuinenga (2005). Pivot Point Procedures in Practical Travel Demand Forecasting, ERSA conference paper, Amsterdam.
- De Palma, A. und F. Marchal (2002). Real Cases Applications of the Fully Dynamic METROPOLIS Toolbox, Networks and Spatial Economics, No.2, 347-369.
- Downs, A. (1992). *Stuck in Traffic: Coping with Peak-Hour Traffic Congestion*. Washington (DC): The Brookings Institution.
- Friedrich, M. und P. Vortisch (2005). Verfahren zur dynamischen Verkehrsumlegung - Ein methodischer Überblick, Straßenverkehrstechnik. Vol. 3, 128-144.
- Fröhlich, P., C. Weis, M. Vrtic und P. Widmer (2014). Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten, Forschungsauftrag für das Bundesamt für Strassen und SVI, Bern.
- Lamotte, R. (2018). *Congestion and departure time choice equilibrium in urban road networks*, Dissertation Nr. 8862, EPFL, Lausanne.
- Ortúzar, J, und L. Willumsen (2011). *Modelling Transport*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Polak, J. W. und P. M. Jones (1994). A tour-based model of journey scheduling under road pricing. 73rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Scherr, W., P. Manser und P. Bützberger (2020). SIMBA MOBI: Microscopic Mobility Simulation for Corporate, Planning, Transportation Research Procedia 49, 30-43.
- Small, K. (1982). The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips. *American Economic Review*, 72, 467-479.
- Sutter, D., P. Fröhlich, A. Greinus, C. Bieler, C. Weis, M. Vrtic, S. Suter, M. Setz, C. Lieb und M. Amacher (2019). Mobility Pricing – Wirkungsanalyse am Beispiel der Region Zug, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.
- Thorhauge, M., A. Vij und E. Cherchi (2021). Heterogeneity in departure time preferences, flexibility and schedule constraints. *Transportation* 48, 1865-1893.
- Thorhauge, M., E. Cherchi und J. Rich, (2016). How flexible is flexible? Accounting for the effect of rescheduling possibilities in choice of departure time for work trips. *Transportation Research Part A Policy & Practice* 86, 177-193.
- Vrtic, M., P. Fröhlich, C. Weis, J. von Sury, und B. Bodenmann (2020a). Gesamtverkehrsmodell Kanton Luzern, Kanton Luzern (vif), Luzern.

- Vrtic, M., C. Weis, P. Fröhlich, B. Bodenmann, J. Pillat, J. Uhlig, und J. Landmann (2020b). Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017, Bundesamt für Raumentwicklung, Strassen und Verkehr, Bern.
- Vrtic, M., C. Weis und P. Fröhlich (2016). Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK, Zeitscheiben und Spitzenstundenmodelle für den Basiszustand 2010 und den Referenzzustand 2040, Bundesamt für Raumentwicklung, Strassen und Verkehr, Bern.
- Vrtic, M. und K. W. Axhausen (2003). Experiment mit einem dynamischen Umlegungsverfahren, *Strassenverkehrstechnik*, 47 (3) 121-126.
- Willumsen, L. (2014). *Better Traffic and Revenue Forecasting*. Maida Vale Press.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 3. Juni 2025

Grunddaten

Projekt-Nr.: VPT_20_01C_01

Projekttitel: Erstellung von Grundlagen für die Beeinflussung von Tagesganglinien

Enddatum: 30. November 2025

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Das Projektziel war die Erstellung von Daten- und Modellgrundlagen für die Bewertung von Massnahmen zur Beeinflussung von Tagesganglinien der Verkehrsnachfrage. Erreicht wurde dies durch die Etablierung eines praxistauglichen dynamischen Verkehrsmodells für MIV und ÖV inklusive Wahl der Abfahrtszeit. Damit können verkehrliche Massnahmen wie dynamisches Mobility Pricing, zeitliche Angebotsänderungen wie z.B. Pannestreifennutzung oder Kapazitätserweiterungen zu Spitzenstunden und Tagesganglinien im Prognosezustand realitätsnah modelliert werden.

Im Projekt wurde eine Methodik zur Abbildung der Abfahrtszeitwahl in einem makroskopischen Verkehrsmodell entwickelt. Diese ermöglicht eine Ergänzung der Abbildung einer Abfahrtszeitwahl in bestehenden makroskopischen Modellen. Die Spezifizierung des Nutzens und die entsprechende Parameterschätzung zur Abbildung der zeitlichen Nachfrageverschiebung wurde empirisch fundiert auf Basis der Resultate der Stated Preference-Befragung 2021 vorgenommen. Die Umsetzung erfolgte im Gesamtverkehrsmodell des Kanton Luzerns sowie für Teile der Methodik im Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM).

Die Resultate der drei Testszenarien zeigen für die Abfahrtszeit- und Routenwahl sinnvolle Resultate, welche im Bereich der Erwartungswerte und Erfahrung in Projekten mit einfacheren Modellansätzen liegen.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Projektziele wurden erreicht, wobei einige zusätzliche Problemstellungen gelöst werden mussten. Insbesondere musste aufgrund von Defiziten der Software ein eigener Ansatz der dynamischen IV-Umlegung entwickelt werden. Die Praxistauglichkeit konnte mit den drei Testscenarien gezeigt werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die dynamische Betrachtung des Verkehrsgeschehens ist sicherlich eine wichtige Perspektive für die Zukunft, um die Nachfrage und das Angebot realistischer abzubilden und eine umfassende Bewertung von Projekten zu ermöglichen. Insbesondere die Auswirkungen von Massnahmen, die auf eine ausgeglichene Verteilung der Verkehrsnachfrage zu Spitzenstunden abzielen, können mit dem entwickelten Ansatz präziser evaluiert werden. Der in diesem Projekt entwickelte Ansatz bietet profunde Grundlagen hierfür.

Publikationen:

Es ist eine Publikation der Modelle (Visum-Files mit Skripten) auf einer Plattform, in einer deutschsprachigen Fachpublikation, wie z.B. Strassenverkehrstechnik, und ein Vortrag bei einer deutschsprachigen Konferenz wie dem Anwenderseminar PTV oder der Heureka geplant.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Fröhlich

Vorname: Philipp

Amt, Firma, Institut: TransSol GmbH

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Begleitgruppe (BG) beurteilt die geleistete Arbeit der Forschungsstelle (FS) als sehr gut und hilfreich für zukünftige Anwendungen von Makromodellen. Die aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Modellierung wurden mit guten eigenen Lösungsansätzen erfolgreich umgangen. Somit konnte trotz Mängeln bei der verwendeten Software ein sinnvoller Vorgehensansatz mit einem praxistauglichen Ergebnis umgesetzt werden. Die FS konnte mit den berechneten Beispielen die Einsatztauglichkeit für regionale und nationale Fragestellungen in der Praxis aufzeigen. Die dabei gewonnenen Erfahrungen zeigen aber auch die Einsatzgrenzen mit den aktuellen Rechnerleistungsfähigkeiten.

Umsetzung:

Der erarbeitete Ansatz für die Berücksichtigung und die Beeinflussung von Tagesganglinien in den verbreiteten Makromodellen ist gut umsetzbar auf Stufe kantonaler oder regionaler Modelle und bedingt auch auf nationaler Ebene. Ein entsprechender Aufwand muss eingerechnet werden, ebenso das erforderliche Modellierungswissen. Wichtig ist, dass in der Praxis damit weitere Erfahrungen gesammelt werden können. Mit dem entwickelten Verfahren können nun wichtige, aktuelle Fragestellungen um eine bessere Auslastung bestehender Verkehrsinfrastrukturen mit den meist bereits vorhandenen Makromodellen untersucht werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Primär besteht aktuell der Bedarf an der Sammlung von Anwendererfahrungen mit dem entwickelten Verfahren. Die Optimierung des Rechenaufwandes (Berechnungsverfahren) wäre ein naheliegender Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Weiter wären auch noch bessere Befragungsgrundlagen für Verständnis und Modellierung der zeitlichen Nachfrageverlagerung und gegebenenfalls auch des Fahrtverzeichtes von Nutzen.

Einfluss auf Normenwerk:

Keine, da bisher keine Normen für die Verkehrsmodellierung bestehen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Dasen

Vorname: Stefan

Amt, Firma, Institut: Amt für Mobilität, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: