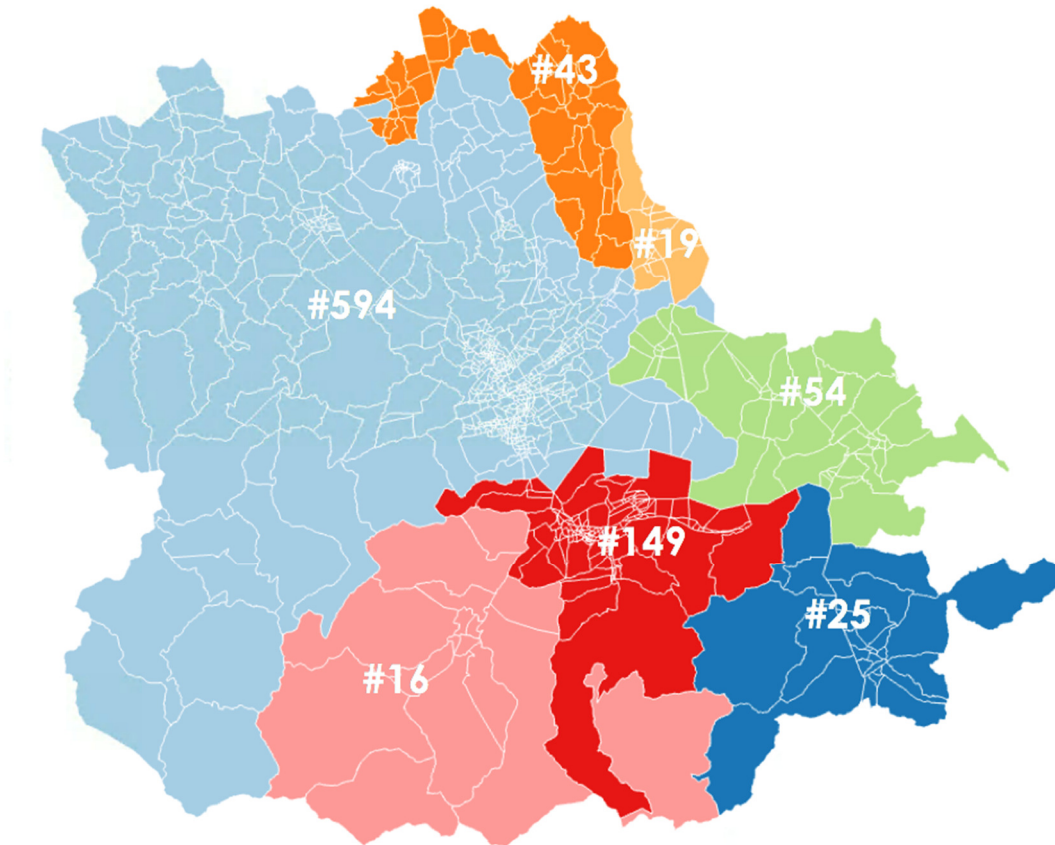




Gesamtverkehrsmodell Kanton Luzern (GVM-LU)

Ist-Zustand 2017 und Prognose 2040



Endbericht, Oktober 2020

Impressum

Auftraggeber

Kanton Luzern,
Verkehr und Infrastruktur (vif),
Arsenalstrasse 43,
6010 Kriens

Projektleiterin:

Danièle Müller
Abteilung Planung Strassen

Auftragnehmer

transOPTIMA

Friedaustasse 18, **4600 Olten**

transSOL

Samstagenstrasse 41, **8832 Wollerau**

plan:team

Planteam S AG, Inseliquai 10, **6005 Luzern**

Strittmatter  Partner AG

Vadianstrasse 37. **9001 St. Gallen**

Bearbeiter

Dr. Milenko Vrtic (Projektleitung)

Dr. Claude Weis

Joseph von Sury

Dr. Philipp Fröhlich

Mirco Derrer

Dr. Balz Bodenmann

Pascal Bürki

Nadja Bernhard

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergründe.....	6
2	Ausgangslage, Ziele und Konzept.....	7
2.1	Strategisches Vorgehen	7
2.2	Anforderungen und Ziele	7
2.3	Modellkonzept.....	9
3	Vorgehen.....	10
3.1	Methode und Lösungsansatz	10
4	Systemabgrenzung.....	12
4.1	Verkehrsart, Verkehrsmittel und Verkehrszwecke.....	12
4.2	Zeithorizonte.....	12
4.3	Modellperimeter.....	12
4.4	Zonierung.....	12
4.5	Zonenanbindungen.....	14
5	Strukturdaten.....	16
5.1	Grundlagen.....	16
5.2	Bevölkerungsdaten am Wohnort («Produzenten»).....	17
5.2.1	Einwohner	17
5.2.2	Auszubildende am Wohnort	17
5.2.3	Mobilität am Wohnort	17
5.3	Strukturdaten am Zielort («Anziehungen»).....	18
5.3.1	Beschäftigte	18
5.3.2	Verkaufsflächen	18
5.3.3	Besucher Freizeit pro Tag.....	19
5.3.4	Auszubildende am Schulstandort	20
5.3.5	Parkierung.....	20
5.4	Resultate	20
6	MIV-Angebot.....	22
6.1	Ausgangsdaten.....	22
6.2	Netzvereinfachung.....	23
6.3	Streckentypisierung	23
6.4	CR Funktionen.....	25

6.5	Knotenpunktwiderstände	27
7	ÖV-Angebot.....	30
8	Nachfragemodell 2017.....	32
8.1	DWV-Modell.....	33
8.1.1	Erzeugungsmodell.....	34
8.1.2	Modellparameter.....	42
8.1.3	Matrixerstellung: Vorgehen	43
8.1.4	Validierung der Matrixstruktur (Binnenmatrix).....	48
8.1.5	Umlegung und Validierung der Netzbelastungen.....	54
8.2	Spitzenstundenmodelle	57
8.2.1	Ableitung der zeitlichen und räumlichen Nachfragevariationen nach QZG	57
8.2.2	Berechnung von stundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen.....	57
8.2.3	Ableitung der Spitzenstunden- aus den Stundenmatrizen (Personenverkehr).....	58
8.2.4	Ableitung der fahrtzweckspezifischen DWV-Matrizen	61
8.2.5	Berechnung des DTV aus dem DWV	61
9	Modellkalibration.....	62
9.1	Zählzeiten MIV.....	62
9.2	Zählzeiten ÖV	66
9.3	Kalibration des DWV-Modells.....	68
9.3.1	Vorgehen.....	68
9.3.2	Ergebnisse Eckwerte	69
9.3.3	Ergebnisse Netzbelastungen.....	74
9.4	Kalibration des MSP-Modells	79
9.4.1	Ergebnisse Netzbelastungen.....	79
9.5	Kalibration des ASP-Modells	83
9.5.1	Ergebnisse Netzbelastungen.....	83
9.6	Kalibration des DTV-Modells.....	87
9.6.1	Ergebnisse Netzbelastungen.....	87
10	Prognosezustand 2040.....	91
10.1	Strukturdaten.....	91
10.1.1	Rahmenbedingungen gemäss Kantonalen Richtplänen	91
10.1.2	Methodik.....	92
10.1.3	Veränderungen aufgrund Demographie und Mobilitätsverhalten.....	93
10.1.4	Datenstruktur.....	94

10.1.5	Mengengerüst.....	95
10.1.6	Resultate Prognosezustand 2040.....	96
10.2	MIV-Netz	98
10.3	ÖV-Netz.....	98
10.4	Berechnung der Verkehrsnachfrage	102
10.5	Ergebnisse	105
10.5.1	Binnenströme.....	105
10.5.2	Binnen- und Aussenströme.....	107
10.5.3	Spitzenstunden	110
10.5.4	Netzbelastungen	110
11	Schlussfolgerungen	116
12	Erweiterungsmöglichkeiten	118
13	Literatur	119

1 Hintergründe

Die wesentliche Aufgabe der Verkehrsplanung ist es, mit Hilfe spezieller Verfahren, Methoden und Modelle Aussagen über mögliche zukünftige Verkehrsentwicklungen zu erarbeiten. Die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungen führen aber dazu, dass die verkehrspolitischen Ziele und damit auch die verkehrsplanerischen Aufgaben im Laufe der Jahre anders formuliert werden. Während bis zum Ende der achtziger Jahre die Entwicklung von Verkehrsnetzen und -anlagen im Vordergrund stand, wird in den letzten Jahren zunehmend die Wirksamkeit von Lenkungsinstrumenten zur gezielten Nachfragebeeinflussung untersucht.

Durch die veränderten verkehrspolitischen Ziele hat die Komplexität der Aufgaben der Verkehrsplanung und dafür benutzten Instrumente ebenfalls zugenommen. Die Suche nach geeigneten Beeinflussungsinstrumenten und Massnahmen für eine gezielte Nachfrageaufteilung und -steuerung hat dazu geführt, dass Verkehrsmodelle zu einem unverzichtbaren Verkehrsplanungsinstrument geworden sind, sei es für die Analyse kleinräumiger Fragestellungen (wie z.B. Knotenstromanalysen) oder zur Ermittlung grossräumiger Veränderungen (wie z.B. Auswirkungen von Veränderungen in der Siedlungsstruktur).

Der Kanton Luzern, vertreten durch die Dienststelle Verkehr und Infrastruktur (vif) verfügt über ein kantonales Verkehrsmodell (KVM-LU), welches seit seiner Erstellung 2005 für verschiedene Fragestellungen beim Kanton, beim Bund und in den Regionen eingesetzt wurde. Das Modell wurde auf Basis des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2000 etabliert und mehrmals teilweise oder lokal aktualisiert (Anpassung des Strassennetzes, des Verkehrsregimes, der Zählzeiten und der Siedlungsdaten). Die letzte wichtige Teilaktualisierung wurde im Zusammenhang mit dem generellen Projekt A2 / A14 Gesamtsystem Bypass Luzern (Ist-Zustand 2010 und Prognose 2030) durchgeführt. Dieses Modell stösst infolge veralteter Datengrundlagen zunehmend an seine Grenzen, ausserdem können bestimmte Fragestellungen, wie z.B. Mobility Pricing nicht modelliert werden.

Im Zusammenhang mit den ab 2017 zur Verfügung stehenden Daten zum Verkehrsverhalten (Mikrozensus Mobilität und Verkehr / MZMV 2015) und den Ergebnissen der Stated-Preference-Befragungen (SP-Befragungen) des Bundes (ARE) sowie aktuellen Siedlungs- und Zählzeiten hat der Kanton Luzern beschlossen, das kantonale Verkehrsmodell zu aktualisieren.

Der Fokus bei der Etablierung des neuen Gesamtverkehrsmodells für den Kanton Luzern liegt auf der Erstellung eines Modells zur Analyse und Prognose der Verkehrsbeziehungen resp. -belastungen.

2 Ausgangslage, Ziele und Konzept

2.1 Strategisches Vorgehen

Bei der Analyse von verkehrlichen Auswirkungen von Angebots- oder siedlungsstrukturellen Massnahmen innerhalb des Kantons Luzern ist die geographische Lage des Kantons und die dadurch verursachte Zusammensetzung der Verkehrsströme eine wesentliche Rahmenbedingung. Diese Verflechtung ist sowohl durch wirtschaftliche und soziale Beziehungen als auch durch das Verkehrsangebot vorgegeben.

Aufgrund seiner räumlichen Lage und Ausdehnung bestehen vielfältige und gewichtige Verkehrsbeziehungen zwischen dem Kanton Luzern und seinen Nachbarkantonen. Ein Gesamtverkehrsmodell muss diese Beziehungen zwingend berücksichtigen; idealerweise ergänzt sich dieses Modell mit vergleichbaren Modellen der Nachbarkantone. Dazu bieten sich die Gesamtverkehrsmodelle der Kantone Zürich (GVM ZH), Zug (GVM ZG), Aargau (GVM AG) und Bern (GVM BE) sowie das Nationale Personenverkehrsmodell (NPVM) an, welche sowohl auf der gleichen Methodik als auch auf vergleichbaren Grundlagendaten basieren. Dadurch können sowohl aus Sicht der Modellanwendung als auch aus Sicht künftiger Aktualisierungen Synergien optimal genutzt werden.

2.2 Anforderungen und Ziele

Für die Abschätzung der Nachfrageauswirkungen von Angebots- und Raumdatenveränderungen sind realistische Abbildungen des Verkehrsangebots, der Verkehrsnachfrage und der Wirkungszusammenhänge bzw. Gesetzmässigkeiten im Verkehrsmodell die wesentlichen Grundlagen. Das Modell soll neben dem verkehrlichen Geschehen auf den einzelnen Verkehrsträgern auch die Wechselwirkungen zwischen diesen zuverlässig abbilden und prognostizieren können. Um für die Analyse der Wirkungsziele der Verkehrspolitik im Kanton Luzern so weit wie möglich auch quantitative Grundlagen zu liefern, muss das Modell neben den verkehrlichen Wirkungen im eigentlichen Sinne (Nachfrage, Geschwindigkeiten, etc.) auch verlässliche Grundlagendaten für die Schätzung der positiven und negativen Nebenwirkungen des Verkehrs, wie z.B. Lärm- und Luftbelastung, liefern.

Zusätzlich ist es für die Modellanwendungen vor allem bei komplexeren Massnahmen sehr wichtig, dass neben deren Routen- und Verkehrsmittelwahleffekten auch die Zielwahl- und Verkehrserzeugungsveränderungen, einschliesslich der Auswirkungen einer veränderten Siedlungsstruktur, prognostiziert werden können. Solche Anwendungen verlangen ein Verkehrsmodell mit den Modi MIV, ÖV, Velo und Fussverkehr.

Die Erstellung eines multimodalen Verkehrsmodells muss somit mit folgenden Grundanforderungen verbunden werden:

- realitätsentsprechende Abbildung des **Verkehrsangebots**;
- realitätsentsprechende Abbildung des **Verkehrsgeschehens im Raum und nach Verkehrsmitteln**;
- realitätsentsprechende Abbildung des **Verkehrsverhaltens** (Modellparameter / Elastizitäten).

Ziel des Projekts ist die Erstellung eines prognosefähigen, massnahmensensitiven und multimodalen Verkehrsmodells für den Kanton Luzern für den Ist-Zustand (2017) und den Prognosezustand (2040). Das erstellte Modell soll dabei folgende Anforderungen erfüllen:

- **logische Konsistenz**: keine inneren Widersprüche im Modellaufbau;
- **Massnahmenempfindlichkeit**: zuverlässige Abbildung der zu untersuchenden Massnahmen;
- **Handhabbarkeit**: vertretbarer Aufwand bei der praktischen Umsetzung;

- **Transparenz:** Ergebnisse müssen nachvollziehbar, wiederholbar und kontrollierbar sein;
- **Validität:** Eingangsdaten und Ansätze müssen auf realen Erhebungen basieren.

Weiterhin ist auch die Schnittstelle zum Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) sicherzustellen.

Das Projekt liefert als Ergebnis folgende Modellzustände:

- Z0 – Ist-Zustand 2017:
 - Modell für den durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) mit auf Querschnittszählungen kalibrierten Quelle-Ziel-Matrizen für die Nachfragesegmente: Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen und Last-/Sattelzüge, ÖV-Passagiere;
 - Quelle-Ziel-Matrizen für den Fuss- und Veloverkehr (DWV). Nicht auf Querschnittszählungen kalibriert;
 - Morgen- und Abendspitzenstundenmodell (MSP und ASP) mit auf Querschnittszählungen kalibrierten Quelle-Ziel-Matrizen für die Nachfragesegmente: Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen und Last-/Sattelzüge, ÖV-Passagiere;
 - Fahrtzweckspezifisches DWV-Modell für die Fahrtzwecke: Arbeit, Ausbildung, Nutzfahrt, Einkauf und Freizeit;
 - Modell für den durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) mit auf Querschnittszählungen kalibrierten Quelle-Ziel-Matrizen für die Nachfragesegmente: Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen und Last-/Sattelzüge, ÖV-Passagiere;
 - Nachfragemodell (EVA) für den DWV.
- Z1 – Prognosezustand 2040:
 - Modell für den durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) mit den Nachfragesegmenten: Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen und Last-/Sattelzüge, ÖV-Passagiere;
 - Quelle-Ziel-Matrizen für den Fuss- und Veloverkehr (DWV). Nicht auf das Netz umgelegt;
 - Morgen- und Abendspitzenstundenmodell (MSP und ASP) mit den Nachfragesegmenten: Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen und Last-/Sattelzüge, ÖV-Passagiere;
 - Fahrtzweckspezifisches DWV-Modell für die Fahrtzwecke: Arbeit, Ausbildung, Nutzfahrt, Einkauf und Freizeit;
 - Modell für den durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) mit den Nachfragesegmenten: Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen und Last-/Sattelzüge, ÖV-Passagiere;
 - Nachfragemodell (EVA) für den DWV.

Methodik und Ergebnisse aller Modelletablierungs- und Prognoseschritte wurden von einer Begleitgruppe genehmigt. Die Begleitgruppe setzt sich aus folgenden Mitgliedern zusammen:

Patrick Abegg	Bau-, Umwelt und Wirtschaftsdepartement Kanton Luzern (BUWD)
Armin Camenzind	LuzernPlus
Cüneyd Inan	Dienststelle Raum und Wirtschaft (rawi)
Daniel Peter Joelle Linggi	rawi, Geoinformation (GIS)
Daniel Herr Samuel Urech	Verkehrsverbund Luzern (VVL)
Franz Schöpfer	Dienststelle Umwelt und Energie (uwe)
Milena Scherer Roland Koch	Tiefbauamt Stadt Luzern
Thomas Kloth	ASTRA
Nathalie Frischknecht Marcus Riedi	SBB
Richard Blättler	Amt für Mobilität Kanton NW

2.3 Modellkonzept

Das vorgeschlagene Modellkonzept stellt den aktuellen Stand der Technik für die Erstellung und Anwendung von Verkehrsmodellen dar. Dies bezieht sich auf alle drei Modellkomponenten: Verkehrsangebot, Verkehrsnachfrage und Verhaltensgesetzmässigkeiten (Modellparameter). Für die Aktualisierung des GVM LU wird das Softwarepaket VISUM 18.0 mit EVA der Firma PTV AG (Karlsruhe) verwendet, welches sich in der Vergangenheit als geeignetes Paket für die Bearbeitung dieser Art von Fragestellungen bewährt hat. Die entsprechenden Programme sind heute in zahlreichen europäischen Ländern sowohl bei nationalen als auch bei regionalen Modellen die am häufigsten verwendeten Planungstools. Vor allem bei planerischen Aufgaben, bei denen die Berücksichtigung des ÖV in seiner ganzen Komplexität relevant ist, bietet VISUM die Möglichkeit einer wesensgerechten Abbildung des ÖV-Angebots und für den ÖV geeignete Umlegungsverfahren.

Ein weiterer Vorteil von VISUM sind die umfangreichen Erweiterungsmöglichkeiten, durch die zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten des Verkehrsmodells auf einfache Weise erschlossen werden können. An dieser Stelle soll stellvertretend die Import-/Export-Schnittstelle zur Simulationssoftware VIS-SIM (ebenfalls ein Produkt der PTV AG) zur Untersuchung von stark belasteten Knotenpunkten bzw. Strassenabschnitten genannt werden.

Für die Erstellung von Quelle-Ziel-Matrizen ist die Beschreibung und Bewertung von Siedlungs-, Angebots- und soziodemographischen Charakteristiken entscheidend. Dafür braucht es Ansätze, die eine sehr detaillierte Segmentierung des Verkehrsverhaltens ermöglichen und gleichzeitig den Einsatz offener und aus Verkehrserhebungen abgeleiteter Verhaltensfunktionen (Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl) ermöglichen. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Auswirkungen von räumlichen Veränderungen und von Angebotsveränderungen mit Verkehrsmodellen ermitteln zu können. Weiterhin ist es wichtig, dass die festgelegten Modellgesetzmässigkeiten die erhobenen Verhaltensgesetzmässigkeiten möglichst realistisch abbilden.

3 Vorgehen

3.1 Methode und Lösungsansatz

Das Vorgehen für die Modellerstellung ist so definiert, dass mit dem Verkehrsmodell die festgelegten Projektziele und Anforderungen vollständig erfüllt werden. Damit wird einerseits eine realitätsnahe Abbildung des Verkehrsgeschehens unter Berücksichtigung seiner Rahmenbedingungen und andererseits die Prognosefähigkeit des Verkehrsmodells sichergestellt.

Der Modellaufbau wird in zwei Schritten durchgeführt:

- Abbildung des Verkehrsgeschehens im Ist-Zustand 2017 (Basismodell);
- Abbildung des Prognosezustands 2040.

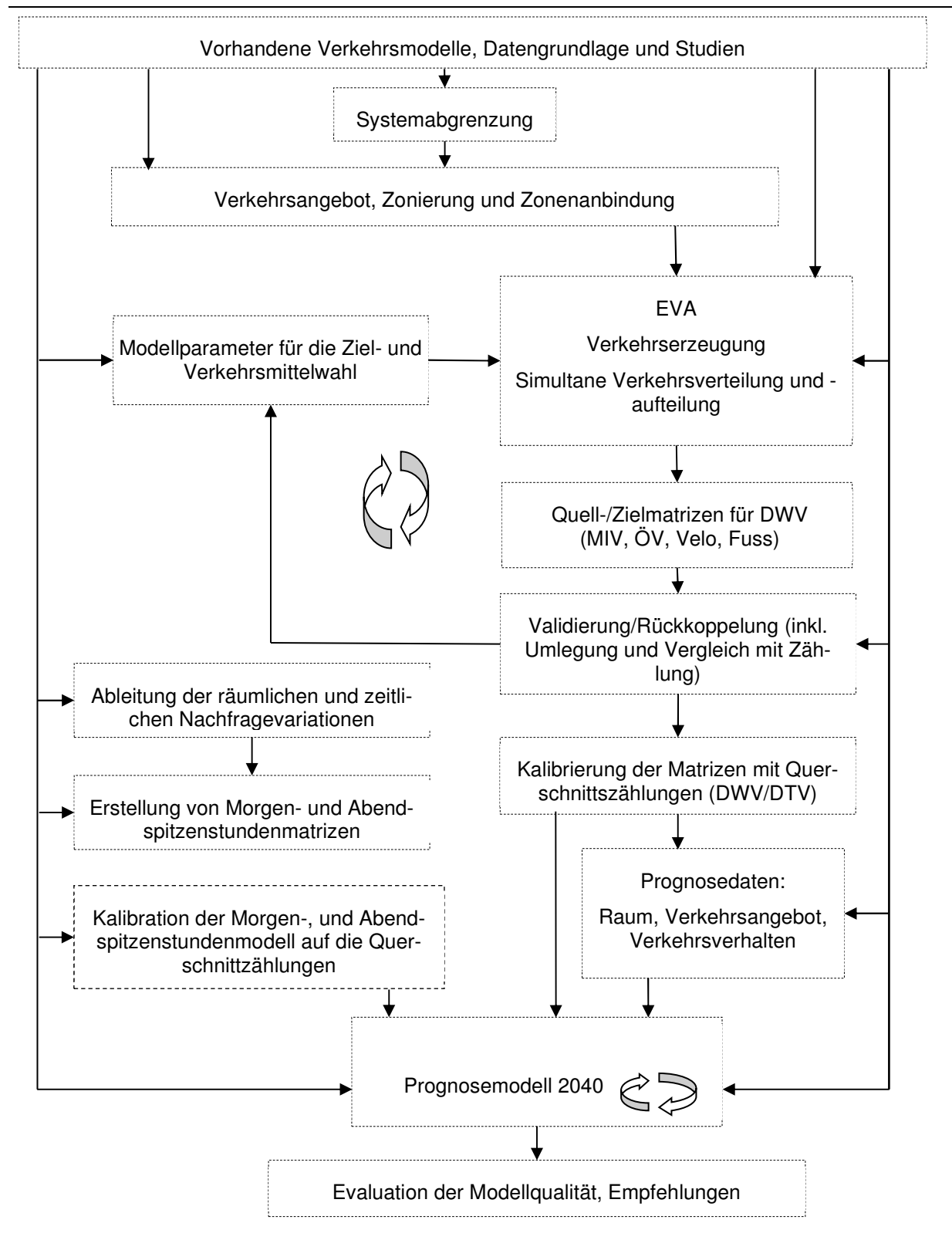
Dabei sind folgende wichtige Arbeitspositionen zu nennen:

- Festlegung der Systemabgrenzungen (räumlich und zeitlich) und des Detaillierungsgrades;
- Abbildung des Verkehrsangebots, Zonierung und Zonenanbindung;
- Aufbereitung der Strukturdaten (Einwohner, Arbeitsplätze, usw.) für den Ist- und den Prognosezustand;
- Schätzung der Modellparameter aus dem MZMV 2015 und SP-Befragung (für alle Modellschritte);
- Erzeugung und Eichung der Matrixstruktur sowie Validierung der Quelle-Ziel-Matrizen (Personenverkehr);
- Übernahme und Eichung der Strassengüterverkehrsmatrizen aus dem nationalen Güterverkehrsmodell;
- Übernahme des Aussenverkehrs (Verkehr der entweder im Modellgebiet beginnt, endet oder diesen durchquert) aus dem nationalen Personenverkehrsmodell des Bundes (ARE);
- Abbildung von Routenwahlparametern und Umlegung;
- Kalibrierung der Quelle-Ziel-Matrizen auf die Querschnittszählungen (DWV);
- Erstellung von Stundenmatrizen und Kalibration von Spitzenstundenmodellen (Morgen- und Abendspitzenstunde), Erstellung und Kalibrierung von DTV-Modellen;
- Prognose-Zustände 2040;
- Dokumentation und Modellübergabe.

Die wesentlichen Arbeitsschritte und das Vorgehen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Mit den Daten aus dem MZMV 2015 und der SP-Befragung 2015 werden die Verhaltensparameter für die Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl geschätzt. Die Erzeugung und Eichung der Quelle-Ziel-Matrizen ist ein iteratives Vorgehen, um eine realitätsnahe Matrixstruktur zu erreichen. Die Erstellung geeigneter Umlegungsmodelle und die Kalibration der Quelle-Ziel-Matrizen auf Querschnittszählungen werden mit einer Modellvalidation abgeschlossen. Aus dem geeichten Tagesmodell können anschliessend die Spitzenstunden- und DTV-Matrizen abgeleitet werden. Dafür müssen in einem ersten Schritt die zeitlichen und räumlichen Variationen der Verkehrsnachfrage aus den Mikrozensus-Daten ermittelt werden. Danach erfolgt die Erstellung des Morgenspitzen- (MSP), Abendspitzen- (ASP) und DTV-Modells. Ausgehend von diesem Basismodell 2017 und unter Einbezug der Angebots-, Raum- und Verhaltensdaten 2040 werden die Prognosemodelle (inklusive Rückkopplung Verkehrsnachfrage/Verkehrsangebot) erstellt und validiert.

Abbildung 1: Vorgehen bei der Erstellung des Modells



4 Systemabgrenzung

4.1 Verkehrsart, Verkehrsmittel und Verkehrszwecke

Im Verkehrsmodell wird der Personenverkehr mit den Verkehrsmitteln PW, öV, Fussgänger und Radfahrer (Velo) abgebildet.

Der Strassengüterverkehr wird mit den Fahrzeugklassen Lieferwagen (LI), Lastwagen (LW) sowie Last- und Sattelzug (LZ) berücksichtigt.

Die Verkehrsnachfrage wird für die Fahrtzwecke Arbeit, Ausbildung, Nutzfahrt, Einkauf und Freizeit differenziert gerechnet.

4.2 Zeithorizonte

Das Nachfragemodell sowie das Umlegungsmodell für den durchschnittlichen Werktag (DWV) werden für den Basis-Zustand 2017 etabliert und für den Prognosezustand 2040 angewendet. Der DTV wird aus dem DWV-Modell abgeleitet.

Für die Modellierung der werktäglichen Spitzenstunden wurden folgende Zeitintervalle festgelegt:

- Morgenspitze (MSP) 07:00 bis 08:00
- Abendspitze (ASP) 17:00 bis 18:00

4.3 Modellperimeter

Der Perimeter des Verkehrsmodells besteht aus dem eigentlichen Untersuchungsperimeter (UP) und einem erweiterten Einflussperimeter. Der eigentliche Untersuchungsperimeter, in welchem mit Hilfe des Modells die Verkehrsfragen untersucht werden sollen, umfasst das Gebiet des Kantons Luzern. Um für dieses Gebiet mit der notwendigen Genauigkeit Aussagen machen zu können, ist ein äusseres Einflussgebiet soweit einzubeziehen, als daraus direkte Einflüsse auf den Verkehrsablauf des Untersuchungsgebietes zu erwarten sind. Das Einflussgebiet umfasst die Kantone Nidwalden, Obwalden, sowie Teile der angrenzenden Kantone Aargau, Zug, Schwyz und Uri. Über Aussenzonen (Kordonzonen) wird der restliche Verkehr der Schweiz (und des Auslands) auf den untersuchten Verkehrsnetzen mit einbezogen.

4.4 Zonierung

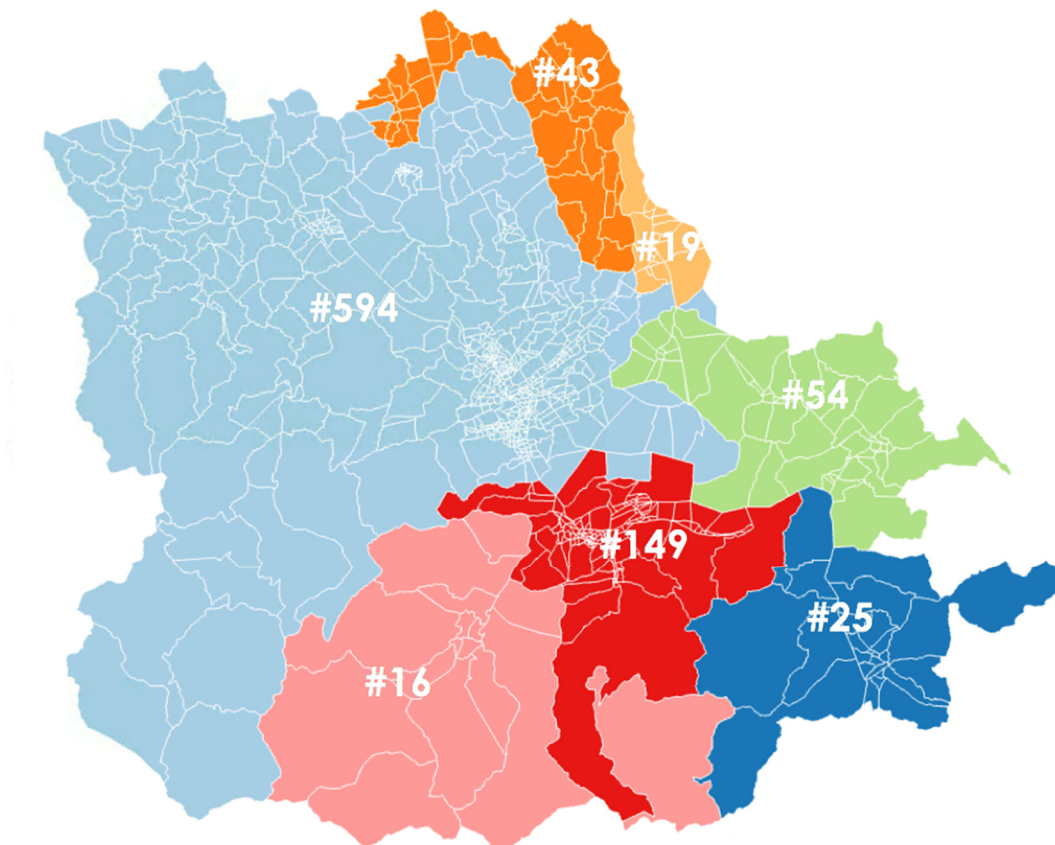
Als kleinste Einheit des Verkehrsgeschehens kann eine Person betrachtet werden. Im Modell werden Ortsveränderungen von Personen von einem Ausgangs- zu einem Zielpunkt beschrieben. Die Wohnung (Haus) dieser Person kann damit als kleinste räumliche Abbildung einer Zone angesehen werden. Alle möglichen Ausgänge aus dem Haus auf die Verkehrsnetze sind als Anbindungen an die Verkehrsnetze zu betrachten. Aus Kapazitätsgründen ist dies für ein Verkehrsmodell mit der vorliegenden räumlichen Ausdehnung nicht möglich. Darum werden diese kleinsten Einheiten zu Verkehrszonen zusammengefasst.

Die Unterteilung des Modellgebietes in Verkehrszonen basiert auf der Eigenschaft, dass benachbarte Personen ein ähnliches Verkehrsangebot haben (sie benutzen z.B. die gleiche Bushaltestelle).

Die Zonierung wurde in enger Zusammenarbeit mit plan:team und der vif festgelegt und deckt den Modellperimeter lückenlos ab. Insgesamt wurden 900 Binnen-, 42 Aussen- und 20 Reservezonen ausgedehnt.

Durch die Modellverfeinerung entsteht gegenüber dem KVM-LU eine neue Zonenunterteilung und – Nummerierung. Diese ist für alle Netze (MIV, OeV und LV) identisch.

Abbildung 2: Übersicht Binnenzonierung (900 Zonen) nach Kantonszugehörigkeit



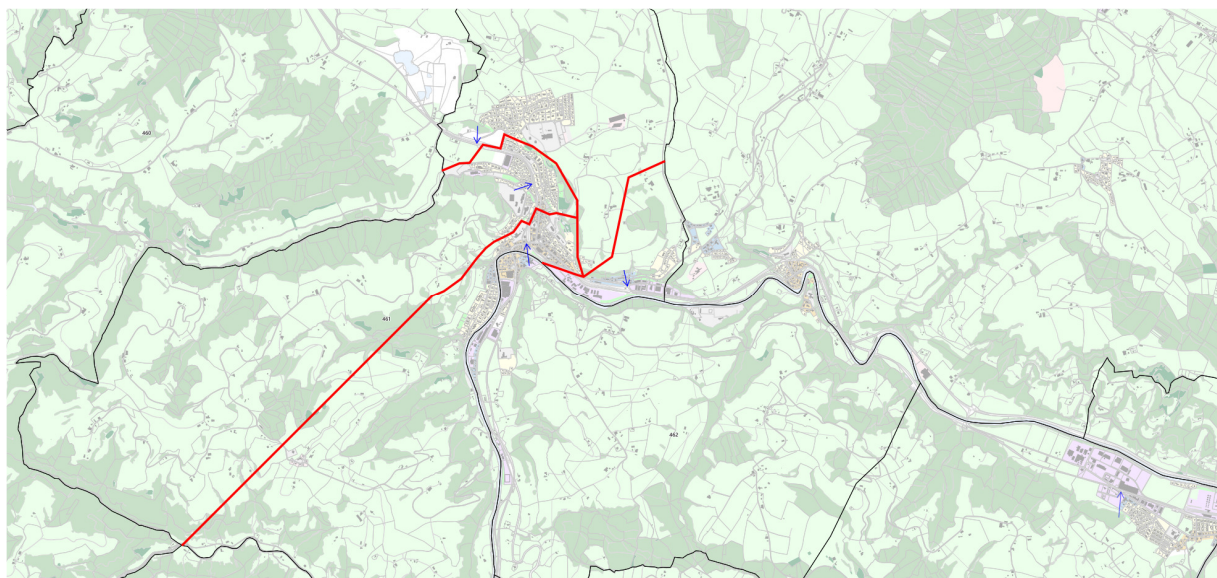
Die sechsstellige Nummerierung der Zonen wurde anhand der BFS-Nummer der entsprechenden Gemeinde, sowie einer zweistelligen Laufnummer gebildet. Ein Beispiel dafür ist «XXXXYY», wobei «XXXX» die BFS-Nummer und «YY» die jeweilige Laufnummer der Gemeinde abbildet. Die Laufnummer beginnt jeweils mit «01». Des Weiteren wurden Sonder- und Einflusszonen definiert, welche durch eine von «99» absteigende Laufnummer gekennzeichnet sind. Durch das Attribut «SONDERZONE» ist die Unterscheidung möglich. Folgende Ausprägungen sind dabei möglich: «0: Keine Sonderzone», «1: Sonderzone» oder «2: Einflusszone». Als Sonderzone ausgewiesen sind z. B. die Zone beim KKL, der Bahnhof Luzern oder der Flugplatz Emmen. Als Einflusszonen wurden die Zonen aus den angrenzenden Kantonen Aargau, Zug, Schwyz und Uri definiert.

Die Reservezonen haben für den Ist-Zustand keine Bedeutung und sind für allfällige zusätzliche Zonen im Prognosemodell (z.B. Entwicklungsschwerpunkte) vorgesehen. Der Vorteil der Reservezonen ist, dass so die Matrixstrukturen und auch die Zonennummern über alle Szenarien identisch bleiben.

4.5 Zonenanbindungen

Anbindungen (wirkliche oder fiktive Zubringerstrassen) beschreiben die Zu- und Abgangswege zwischen Verkehrszone und Verkehrsnetz. Im Rahmen der Zonendefinition wurden schon Überlegungen zur Anbindung der Zonen an das Netz angestellt und graphisch dokumentiert (vergleiche blaue Pfeile in Abbildung 3). Diese Vorgaben bilden den Ausgangspunkt für die weiteren verfeinerten Anbindungsdefinitionen. Es wurde soweit wie möglich versucht, die Anbindungen des MIV nicht direkt an Kreuzungen und nicht mehrere Anbindungen an einen Knoten bzw. Haltestelle zu legen.

Abbildung 3: Überlegungen zur Zonenanbindung



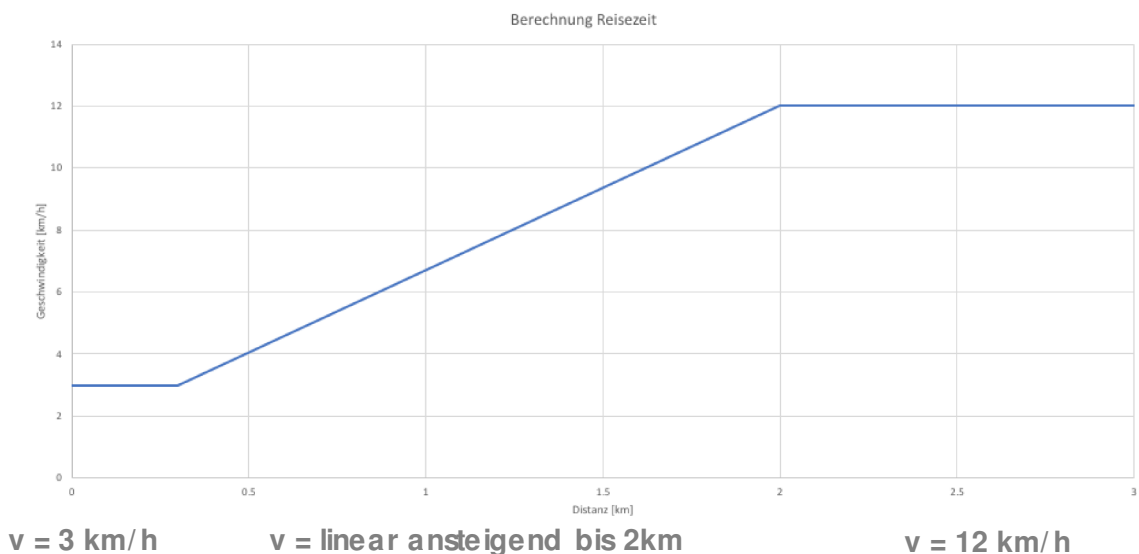
Für den ÖV wurde eine Anbindung an die nächstgelegene Haltestelle im Umkreis von 200m definiert und eine zusätzliche Anbindung, wenn ein Bahnhof innerhalb von 400m liegt.

Die Anbindungszeit wird aus der Luftlinienentfernung und folgenden Geschwindigkeitsannahmen berechnet (Abbildung 4):

- $v = 3 \text{ km/h}$ bis 300 m
- v ist linear ansteigend von 3 km/h bis 12 km/h bei einer Distanz von 300 m bis 2'000 m
- über 200 m beträgt die Geschwindigkeit v konstant 12 km/h

Mit diesem Vorgehen wird dem zunehmenden Veloanteil bei längeren Anbindungsängen Rechnung getragen. Die Mindestanbindungszeit beträgt zwei Minuten.

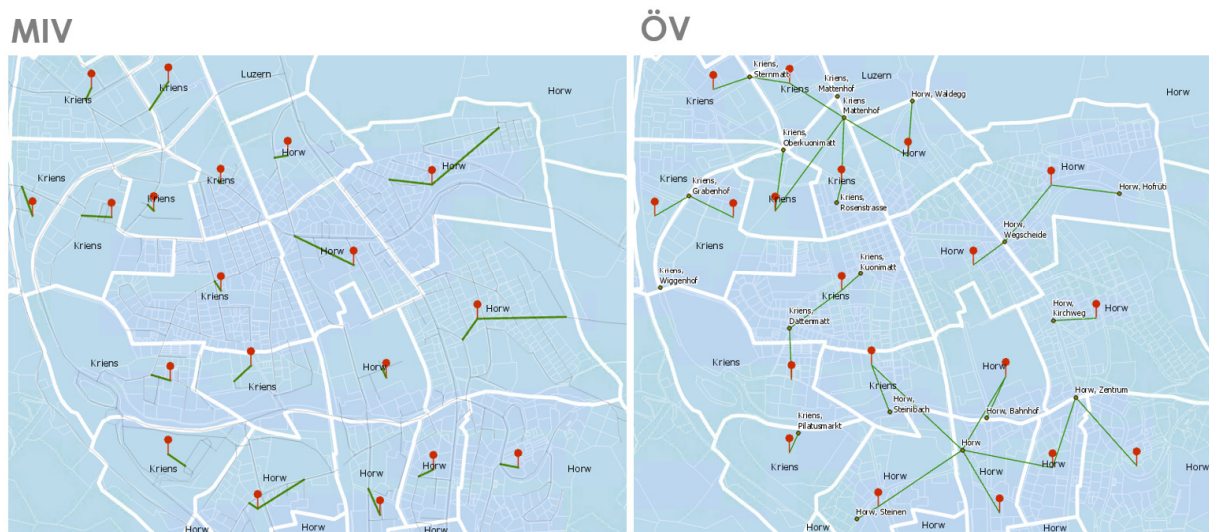
Abbildung 4: Verlauf Anbindungsgeschwindigkeit ÖV



Im MIV wurden die Anbindungen an das untergeordnete Netz verortet, damit der Verkehr realitätsnah auf das Hauptstrassennetz einfährt. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf die Ein- und Ausfahrten bei grossen Firmen, Parkplätzen, Einkaufszentren, etc. gelegt. Die Anbindungsgeschwindigkeit beträgt konstant 15 km/h und die minimale Anbindungszeit 2 min.

Es wurden manuelle Mehrfachanbindungen mit Anteilen vorgesehen, wenn mehrere Siedlungsschwerpunkte in einer Zone liegen. Abschliessend erfolgte eine visuelle Kontrolle mit Karte und Luftbild sowie eine weitere Verfeinerung im Rahmen der Modellkalibration. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich der MIV und ÖV-Anbindungen am Beispiele Horw.

Abbildung 5: MIV- und ÖV-Anbindungen gezeigt am Beispiel Horw (rot: Zonenschwerpunkt, grün: Anbindung)



5 Strukturdaten

Für die Erzeugung der Verkehrsströme bilden Strukturdaten eine wichtige Grundlage. Dazu gehören einerseits Daten zu den wichtigsten „Produzenten“ von Verkehrsaufkommen (z.B. Wohnbevölkerung, Erwerbstätige) und zu den wichtigsten Anziehungspunkten des Verkehrs (z.B. Arbeitsplätze, Ausbildungsplätze, Freizeitangebote), andererseits aber auch Faktoren, welche die Verkehrsmittelwahl wesentlich beeinflussen (z.B. Fahrzeugbesitz, Verfügbarkeit von Parkplätzen, Abos im ÖV).

Für das neue GVM LU wurde ein umfangreicher Strukturdatensatz mit insgesamt **66** Variablen erstellt. Die Strukturdaten werden jeweils pro Verkehrszone und mehrheitlich für das Jahr 2017 angegeben. Da die meisten Daten nicht auf Ebene der Verkehrszone und für das Jahr 2017 zur Verfügung stehen, mussten entsprechende Annahmen für die Verteilung auf die einzelnen Verkehrszone und die Hochrechnungen auf das Jahr 2017 getroffen werden. Die einzelnen Vorgehensweisen werden in den nachfolgenden Kapiteln genauer beschrieben.

Die Strukturdaten für den Ist-Zustand 2017 und den Prognosezustand 2040 wurden von den Firmen plan:team sowie Strittmatter Partner aufbereitet.

5.1 Grundlagen

Für die Erarbeitung der einzelnen Strukturdaten konnten diverse statistische Daten als Grundlage hinzugenommen und zweckmässig verarbeitet werden. Es handelt sich um die folgenden Daten:

Beschäftigte (nach NOGA-Klassen)

Als Grundlage für die Beschäftigten dienen die aktuellsten Daten aus STATENT (aktuellster Stand aus dem Jahr 2015, Kantone LU, OW, NW). Diese sind georeferenziert pro Betriebsstandort vorhanden. Zusätzlich wurden vorhandene Daten aus der Aktualisierung der Siedlungsdaten für das GVM LU aus dem Jahr 2017 (Projekte) hinzugefügt. So konnten die aktuellsten Beschäftigtenzahlen abgeleitet werden.

Für die Einflusszone ausserhalb der Kantone Luzern, Ob- und Nidwalden werden die Daten aus dem NPVM übernommen.

Einwohner

Als Grundlage für die Einwohnerberechnung dienen die Daten aus STATPOP (aktuellster Stand Stichtag Ende 2017, Kantone LU, OW, NW). Die Daten sind georeferenziert pro Einwohner vorhanden.

Schüler

Als Grundlage für die Schüler diente die Auswertung der Lernendenzahlen Kanton Luzern nach Bildungsinstitution. Die Bildungsinstitutionen konnten georeferenziert dargestellt werden.

Für die Kantone OW und NW lagen keine Schülerdaten vor.

Im Weiteren konnte auf die aktualisierten Strukturdaten des nationalen Personenverkehrsmodells (NPVM), mit wenigen Einschränkungen, zurückgegriffen werden. Daher sind die Einflusszone in den nachfolgenden Kapiteln nicht weiter erwähnt.

Die Herleitung der einzelnen Strukturdaten ist im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

5.2 Bevölkerungsdaten am Wohnort («Produzenten»)

5.2.1 Einwohner

Die Einwohner sind nach Alter aufgeteilt. Die Altersverteilung wurde wie folgt definiert:

- <17-jährig
- 18- bis 24-jährig
- 25- bis 44-jährig
- 45- bis 64-jährig
- 65- bis 74-jährig
- über 75-jährig

(Quelle: STATPOP 2017)

Auf Basis der Einwohnerdaten wurden die Erwerbstätigen geschätzt. Dabei dienten die statistischen Daten von LUSTAT zu den prozentualen Anteilen von Erwerbstätigen an der Gesamtbevölkerung nach Altersgruppen als Grundlage. Für die Kantone Ob- und Nidwalden wurden diese statistischen Werte aus dem Kanton Luzern angewandt.

- <15-jährig = 0 %
- 15- bis 24-jährig = 67%
- 25- bis 34-jährig = 92 %
- 35- bis 44-jährig = 90 %
- 55- bis 64-jährig = 77 %
- über 64-jährig = 7 %

(Quelle: LUSTAT 2017)

5.2.2 Auszubildende am Wohnort

Für die Auszubildenden am Wohnort sind keine unmittelbaren statistischen Daten vorhanden. Daher wurde auf Basis des Alters der Einwohner (vgl. Kapitel 5.2.1) und der Statistik der Erwerbstätigen einen Anteil an Auszubildenden abgeschätzt und mit den Daten des NPVM verglichen. Daraus wurde pro Altersgruppe ein entsprechender Faktor angewandt.

Im Weiteren wurden als Kontrolle die 6- bis 24-jährigen (alle Ausbildungsstufen) sowie die 18- bis 24-jährigen Einwohner (Universität, Fachhochschule, Weiterbildung) aufgeführt. (Quellen: STATPOP 2017, LUSTAT 2017)

5.2.3 Mobilität am Wohnort

Die Strukturdaten für die Beschreibung der Mobilität am Wohnort bestehen aus verschiedenen Grundlagen, welche mit Ausnahme des Personenwagenbesitzes für den Kanton Luzern allesamt aus dem NPVM übernommen und auf die Verkehrszonen des GVM LU angepasst werden konnten. Es handelt sich dabei um die folgenden Daten:

- Verfügbarkeit Personenwagen
- Besitz Halbtax
- Besitz Generalabonnement
- Besitz Verbundabonnement
- Besitz Personenwagen
- Besitz Firmenwagen

Wie vorgängig beschrieben, wurde der Besitz der Personenwagen aus dem Motorfahrzeugbestand 2017 (Quelle: LUSTAT 2018) übernommen und mit den Daten aus dem NPVM verglichen.

Hinweis: Abo-Werte, welche pro Verkehrszone Werte unter 20 erreicht hätten, sind auf Anweisung des Bundesamtes für Raumentwicklung individuell so angepasst worden, dass eine entsprechende zufällige Zahl eingesetzt wurde. (Quellen: NPVM, Strukturdaten Stand 2018, LUSTAT 2018)

5.3 Strukturdaten am Zielort («Anziehungen»)

Als Basis für die Strukturdaten am Zielort dienen die Beschäftigtendaten (STATENT), welche nach NOGA-Klassen (Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige) unterteilt sind. Damit sind Aussagen zu den Strukturen einzelner Nutzungen (z.B. Verkaufsnutzungen) aus den Beschäftigtendaten ableitbar und die Berechnung der Nachfrage differenziert nach Fahrtzwecken.

5.3.1 Beschäftigte

Die Beschäftigtendaten von STATENT stammen aus dem Jahr 2015, ergänzt mit zusätzlichen Beschäftigtenwerten, welche zwischen 2015 und 2017 aufgrund von Neuansiedlungen (z.B. Mall of Switzerland) hinzukommen, da diese nicht vernachlässigbar sind. Aus dem gleichem Datensatz wurden die Vollzeitäquivalente (FTE) berechnet. Diese Daten sind für jeden Betrieb georeferenziert vorhanden und konnten entsprechend auf die Verkehrszonen aggregiert werden. (Quellen: STATENT 2015, Eigene Erhebungen Planteam S AG)

5.3.2 Verkaufsflächen

Verkaufsflächen wurden für den kurzfristigen und für den langfristigen Bedarf berechnet. Die Summe dieser beiden Flächenwerte pro Verkehrszone ist ergänzend als Total aufgeführt.

Aus den Beschäftigtendaten konnten die Verkaufsflächen hergeleitet werden. Als Grundlagen dienten Daten, welche durch die Planteam S AG im Rahmen der Bearbeitung der Siedlungsdaten 2011 und 2017 erhoben wurden. Im Jahr 2011 wurden für die Erarbeitung der Siedlungsdaten insgesamt 220 Betriebe/Anlagen mit grösseren Parkierungs- oder Verkaufsflächen erhoben. Diese wurden im Rahmen der Überarbeitung mit einigen zusätzlichen Anlagen ergänzt (Quelle: Eigene Erhebungen Planteam S AG, 2011 und 2017).

Mit den aktuellen STATENT-Daten bestand Kenntnis über die Beschäftigten dieser Betriebe und es konnte ein entsprechender Faktor für die Verkaufsflächen berechnet werden (Verkaufsfläche pro Beschäftigte FTE). Für die Verkaufsflächen des kurzfristigen Bedarfs wurden die Beschäftigten der folgenden NOGA-Klassen für den Detailhandel einbezogen: 471, 472, 473, 4773, 4775

Für die Verkaufsflächen des langfristigen Bedarfs wurden die Beschäftigten der folgenden NOGA-Klassen für den Detailhandel einbezogen: 473 bis 479 (Quelle: Bfs 2008: NOGA 2008, Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige).

Es wurden für die Agglomeration Luzern und das Umland differenzierte Annahmen für die Verkaufsflächen pro Beschäftigte FTE vorgenommen, da aus der oben beschriebenen Herleitung klare Unterschiede zwischen städtischen und ländlichen Gemeinden ausgemacht werden konnten (Quelle: Eigene Erhebung Planteam S AG). Für Verkaufsflächen für den kurzfristigen Bedarf sind dies 30 m² pro Beschäftigte FTE in der Agglomeration (Gemeindekategorien gemäss Kantonalem Richtplan Z1-Z4) sowie 40 m² pro Beschäftigte FTE ausserhalb der Agglomeration (Gemeindekategorien gemäss Kantonalem Richtplan A, L1, L2, L3).

5.3.3 Besucher Freizeit pro Tag

Damit im GVM LU der Freizeitverkehr möglichst genau abgeschätzt werden kann, sind die Besucher von Freizeitanlagen und -einrichtungen pro Verkehrszone herzuleiten. In Tabelle 1 sind die Besucherzahlen bei verschiedenen Freizeitnutzung angegeben.

Tabelle 1: Freizeitnutzungen: Besucher pro FTE

Freizeitnutzung	NOGA	Besucher pro Beschäftigte FTE	Bemerkungen, Quellen
Naturparks	9104	315.5	NPVM
Theater und Orchester	900101	584	NPVM
Theater und Orchester, nur KKL	900101	2'577	Planteam, aus Geschäftsbericht
Kino	5914	10'000	Planteam, Werte Kinos Kanton LU
Bibliotheken, allgemein	9101	6'590	NPVM
Bibliotheken, Emmen	9101	12'865	Planteam
Bibliotheken, Stadtbibliothek Luzern	9101	Offizielle Besucherzahl	Planteam
Museen, Stadt Luzern	9102	4'160	NPVM, von Planteam überprüft
Museen, allgemein	9102	4'160	NPVM
Historische Gebäude	9103	10'620	Planteam
Sportanlagen	9311	29'220	NPVM
Fitnesszentrum	9313	29'220	NPVM
Gastronomie	5610	3'500	NPVM, Planteam
Bar, Diskothek	5630	3'500	NPVM
Hotels	55	449	Planteam, Statistik Hotellerie Luzern
Spital	8610	367.7	NPVM
Seilbahnen, allg.	493903	6'103	Planteam
Seilbahnen, Rigi, Pilatus, Sörenberg, Titlis, Stanserhorn	493903	Effektive Besucherzahl	Jeweiliger Geschäftsbericht

5.3.4 Auszubildende am Schulstandort

Für den Kanton Luzern wurde die Auswertung der Lernendenzahlen Kanton Luzern nach Bildungsinstitution von LUSTAT zur Verfügung gestellt. Diese wurden nach dem entsprechenden Bildungsinstitut georeferenziert. (Quelle: LUSTAT 2018)

Für die Herleitung der Auszubildenden in den Kantonen Ob- und Nidwalden wurde aus den Luzerner Daten ein Faktor berechnet, welcher die Anzahl Schüler pro Beschäftigte FTE abbildete (Anzahl Schüler pro Beschäftigte FTE).

Zur Verifizierung der Schülerzahlen wurden die Auszubildenden am Schulstandort in der Gesamtsumme mit denjenigen Daten der Auszubildenden am Wohnstandort verglichen. Im weiteren Projektfortschritt wurde erkannt, dass die Gesamtzahl zwar stimmig ist, jedoch die Verteilung der Auszubildenden am Wohn- bzw. Schulstandort pro Kanton genauer betrachtet werden muss. In einem zweiten Schritt wurde daher die Verteilung der Auszubildenden so angepasst, dass der Anteil an Auszubildenden im Kanton Luzern gegenüber demjenigen der Kantone Ob- und Nidwalden steigt.

5.3.5 Parkierung

Bei der Parkierung wird zwischen privaten und öffentlichen Parkplätzen unterschieden.

Als private Parkplätze werden diejenigen verstanden, welche sich am Wohnort befinden. Es handelt sich somit um Parkplätze, welche direkt von den Einwohnerdaten abgeleitet werden. Zur Berechnung des Faktors pro Einwohner wurde aus dem Mikrozensus Mobilität die Parkplatzverfügbarkeit zu Hause zur Hilfe genommen. Zur Verifizierung wurden in 23 Gemeinden aus den Kantonen LU, OW und NW Stichproben auf Basis der kommunalen Parkplatz- oder Bau- und Zonenreglemente durchgeführt. (Quelle: LUSTAT 2015: Mikrozensus Mobilität)

Als öffentliche Parkplätze werden zum einen diejenigen Parkplätze verstanden, welche sich am Arbeitsort befinden. Diese werden direkt aus den Beschäftigtendaten hergeleitet. Aus den im Jahr 2011 und 2017 erhobenen Daten zu Betrieben und Anlagen bzgl. Verkaufsflächen und Parkplatzanzahl konnte, analog zum Vorgehen bei den Verkaufsflächen, ein entsprechender Faktor berechnet werden. Die Faktoren wurden differenziert nach Nutzung, d.h. nach Verkauf kurz- und langfristig, Dienstleistungen/Büro sowie Gewerbe und Industrie; jeweils auf Basis der NOGA-Klassen. Innerhalb dieser Nutzungen wurden Differenzierungen nach Gemeindetypen gemäss Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) vorgenommen. (Quellen: STATENT 2015, Eigene Erhebungen Planteam S AG)

Im Weiteren gibt es zusätzliche Parkierungsanlagen, welche mit keiner Nutzung/Beschäftigung direkt in Verbindung gebracht werden können (öffentliche Parkplätze/Parkhäuser, P&R-Anlagen). Diese öffentlichen Parkplätze wurden individuell erhoben.

5.4 Resultate

Als Resultat der Berechnungen des Basis-Zustandes 2017 (siehe Tabelle 2) steht ein Datensatz mit Werten zu den folgenden, vorgängig beschriebenen Strukturdaten zur Verfügung (die Resultate sind pro Verkehrszone im entsprechenden Datensatz ersichtlich und werden im Bericht nicht weiter aufgeführt):

Tabelle 2: Strukturdaten 2017 GVM LU

Kategorie	Strukturgrößen
Einwohner	Einwohner Total Erwerbstätige Einwohner 0-17-jährig Einwohner 18-24-jährig Einwohner 25-44-jährig Einwohner 45-64-jährig Einwohner 65-74-jährig Einwohner älter als 75
Auszubildende am Wohnstandort	Schüler am Wohnort Einwohner 6-24-jährig Einwohner 18-24-jährig
Mobilität am Wohnort	Personenwagen verfügbar Halbtax GA Verbundsabo PW-Besitz Firmenwagen
Beschäftigte	Beschäftigte Total Beschäftigte Vollzeitäquivalente
Verkauf	Verkaufsflächen total in m2 Verkaufsflächen kurzfristiger Bedarf in m2 Verkaufsflächen langfristiger Bedarf in m2 Weitere nur für die Einflusszonen (aus dem NPVM übernommen) Besucher Verkauf Besucher Verkauf kurzfristig Besucher Verkauf langfristig Besucher Einkaufszentren
Besucher Freizeit pro Tag	Besucher Naturparks Besucher Orchester / Theater Besucher Kino Besucher Bibliothek Besucher Museen und historische Stätten Besucher Sport Besucher Restaurant Besucher Bars, Disco Besucher Hotel Besucher Spital Besucher Seilbahnen Besucher Kultur Total Besucher Freizeit Total
Auszubildende am Schulstandort	Schüler Primar an Schulstandort Schüler Sek an Schulstandort Schüler Total an Schulstandort Lehrlinge an Schulstandort Studenten an Unistandort
Parkierung	öffentliche Parkplätze private Parkplätze Parkplätze total

6 MIV-Angebot

Das Netzmodell hat eine zentrale Bedeutung für die Qualität des Verkehrsmodells. Zum einen werden verschiedene Kenngrössenmatrizen wie Reisezeiten, Reisekosten usw. aus dem Netzmodell berechnet, die direkt in die Nachfrageberechnung einfließen; zum anderen werden die ermittelten Nachfrage-matrizen auf das Netzmodell umgelegt und so die Netzbelastungen bestimmt.

6.1 Ausgangsdaten

Das Strassennetz wurde aus den Navigationsdaten der Firma TomTom abgeleitet. Der Netzstand war Juni 2017. Es handelte sich dabei um ein vorattributiertes Netzmodell. Damit sind bereits diverse Streckeneigenschaften und fahrzeugspezifische Abbiegerestriktionen enthalten. Für die Ableitung und Kalibrierung von Geschwindigkeiten im Netzmodell wurden die «TomTom Speed Profiles» verwendet, die empirisch erhobene Geschwindigkeitsganglinien als Stundenwerte für die Tageskategorie Dienstag bis Donnerstag enthalten.

Die TomTom-Daten beinhalten einige, für die Streckentypisierung wesentliche, streckenbezogene Attribute:

- Streckenhierarchie (Functional Class, FC)
- Anzahl Spuren
- Lage innerorts/ausserorts
- Geschwindigkeitskategorien und -beschränkungen
- Zulässigkeit von Verkehrssystemen

Das Strassennetz ist in Hierarchiestufen von 0 bis 8 gegliedert. Aufgrund der feinen Verkehrszelleneinteilung wurden im Netzmodell keine Strecken gelöscht, sondern alle Hierarchiestufen beibehalten.

Tabelle 3: Hierarchiestufen TomTom-Daten (engl.)

Hierarchiestufe	Beschreibung
0	Motorway, freeway, or other major arterial roads
1	Major road less important than a motorway, freeway, or other major arterial roads
2	Other major road with significant volumes of traffic, not included by TomTom in FC 1 or 2
3	Secondary roads
4	Local connecting roads
5	Local roads of high importance
6	Local roads
7	Local roads of minor importance
8	All other roads contained within the TomTom Traffic Stats Database

Das aus den TomTom-Daten generierte Basis-Netzmodell wurde in verschiedenen Bearbeitungsschritten an die Anforderungen der Verkehrsmodellierung angepasst. Diese werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

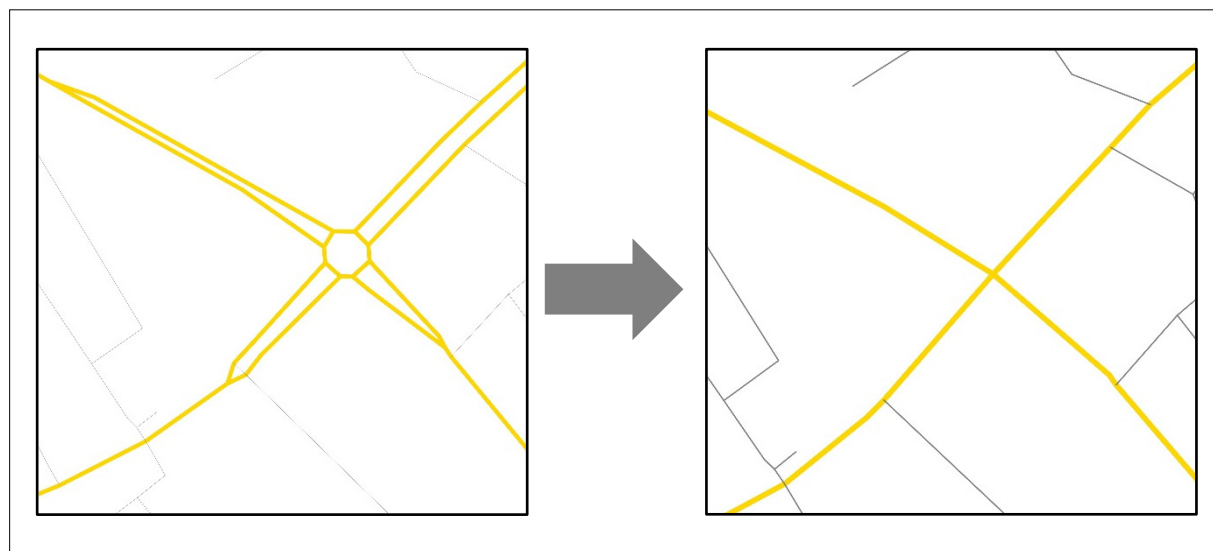
6.2 Netzvereinfachung

Die Netzauflösung der TomTom-Daten ist generell sehr hoch, d.h. getrennte Richtungsfahrbahnen sind als einzelne Strecken enthalten und die Knoten sind entsprechend detailliert abgebildet.

Im Rahmen der Netzvereinfachung wurden plangleiche Knoten zu einem Knotenpunkt zusammengefasst, so dass eine Verwendung von sogenannten Oberknoten im Modell nicht erforderlich war. Auch Kreisverkehre wurden zu einem Knoten reduziert. Die planfreien Knotenpunkte blieben mit ihren zugehörigen Rampen erhalten. Strassen mit getrennten Richtungsfahrbahnen wurden zu einer Kante mit Hin- und Rückrichtung zusammengefasst, wobei die Digitalisierung des Streckenverlaufs beibehalten wurde.

Im Verlauf der Netzvereinfachung wurde sukzessive das Routing überprüft, um eine möglichst fehlerfreie Umsetzung zu erhalten. Insbesondere die Abbiegebeziehungen wurden auf ihre Richtigkeit hin überprüft. Kenngrössenberechnungen von Reisezeit und Entfernung wurden in beiden Netzmodellen durchgeführt und relationsscharf verglichen. Über die Unterschiede konnten Fehler identifiziert und eliminiert werden. Die Netzvereinfachung wurde nur für den Planungsraum durchgeführt. Von der Vereinfachung ausgenommen waren Autobahnen und autobahnähnliche Strassen. In Abbildung 6 ist zur Veranschaulichung der Netzvereinfachung ein Kreisel dargestellt. Damit lässt sich der Aufwand bei Anwendungen reduzieren, die Knotenbelastungen des Kreisels lassen sich beispielsweise als ein einziger Knotenstrom darstellen statt 12 Streckenspinnen.

Abbildung 6: Beispiel Netzvereinfachung Kreisel



6.3 Streckentypisierung

Bei der Einteilung der Streckentypen wurden die Attribute Geschwindigkeit, Fahrstreifenanzahl, Hierarchie, Lage der Strecke sowie Sondertypen wie Rampen und gesperrte Gegenrichtungen berücksichtigt. Für die Qualität der Modellberechnung spielt insbesondere eine realitätsnahe Versorgung des Netzmodells mit der Modellgeschwindigkeit v_0 eine zentrale Rolle.

Die Navigationsnetze enthalten in der Regel ausreichende Informationen für zufriedenstellende Routenauskünfte und Reisezeitabschätzungen im Bereich der Fahrzeugnavigation. Für die Berechnung der Routenwahl und der Reisezeiten innerhalb des Verkehrsmodells werden allerdings genauere Daten benötigt. Daher wurden die Speedprofiles aus den TomTom-Daten, die auf real gefahrenen Geschwindigkeiten beruhen, für die Bestimmung der Modellgeschwindigkeit v_0 verwendet.

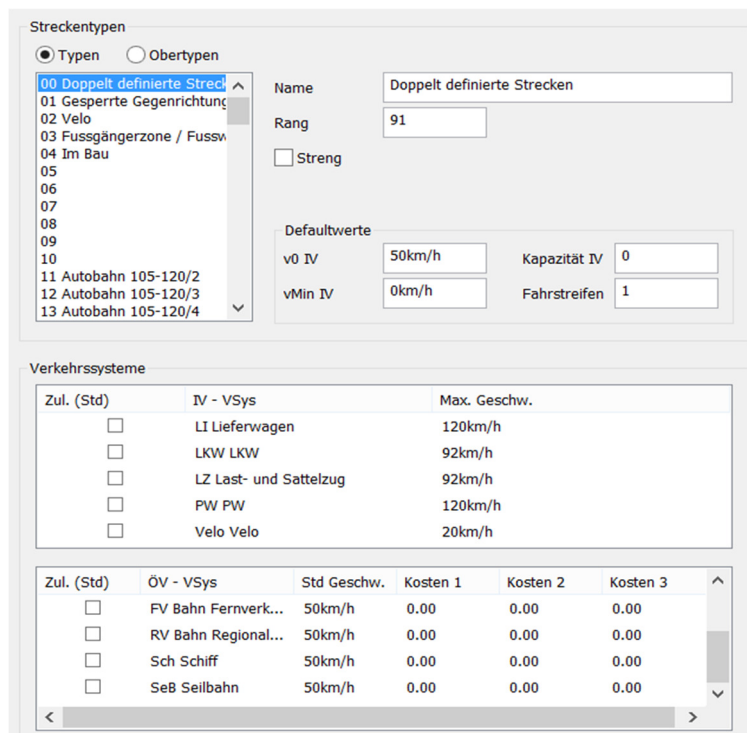
Die Geschwindigkeit v_0 auf den einzelnen Strecken wurde festgelegt. Dazu wurden die TomTom Speedprofiles zugrunde gelegt. Die maximale Geschwindigkeit zwischen 5 und 23 Uhr wurde anhand eines benutzerdefinierten Attributs berechnet, und auf den nächsthöchsten 5 km/h Wert aufgerundet. Bei Strecken ohne Speedprofiles, wurde der Standardwert von TomTom wie folgt geändert: 100 km/h -> 50 km/h und 50 km/h -> 30 km/h. Die v_0 wurden auf allen Strecken überprüft; bei Differenzen auf den Gegenrichtungen wurden die Geschwindigkeiten auf den höheren Wert harmonisiert.

Auf Basis der erfassten und berechneten Streckenattribute wurde eine geeignete Streckentypisierung definiert. PTV Visum erlaubt die Verwendung von 100 verschiedenen Typen. Die Streckentypisierung wurde so angelegt, dass alle Typen eine eindeutige Zuordnung von Kapazität und v_0 haben.

Die Attribute lagen weitgehend mit dem TomTom-Strassennetz vor. Die Daten beinhalteten allerdings keine gesicherte Information zu der Anzahl der Fahrstreifen. Das Attribut wurde anhand von Informationen aus dem NPVM sowie von Luftbildern überarbeitet.

Die Streckentypisierung ist im Netzmodell unter dem Menüpunkt -> Netz -> Streckentypen hinterlegt (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7: Streckentypisierung Netzmodell



Den jeweiligen Streckentypen wurden in Abhängigkeit ihrer Attribute Kapazitäten zugewiesen, die sich an Regelwerken wie HBS (Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen), den Schweizer Normen zur Leistungsfähigkeit und vergleichbaren Verkehrsmodellen orientieren. Die Kapazitäten sind in Kfz/24h angegeben, können aber mit einem streckenspezifischen Faktor, der als benutzerdefiniertes Attribut hinterlegt ist, auf Stundenwerte heruntergerechnet werden. Bei Strecken mit Busverkehr aber ohne eigene Busspur wurde die Kapazität mit der Anzahl Buskurse mit Faktor 3 abgemindert. Als Beispiel: Eine Strecke mit Kapazität von 13'500 Fahrzeugen pro Tag und 70 Buskursen pro Richtung wird auf eine Kapazität von 13'290 ($13'290 = 13'500 - 3 \times 70$) abgemindert. Der Faktor 3 bedeutet, dass ein Bus drei PW-Einheiten entspricht. Ebenso wurde die Kapazität der Abbieger abgemindert.

Sowohl die Kapazitäten im Tagesmodell als auch in den Spitzenstundenmodellen wurden im Lauf der Kalibrierung validiert und eventuell angepasst.

6.4 CR Funktionen

CR-Funktionen bilden zusammen mit der Festlegung der im unbelasteten Netz gefahrenen Geschwindigkeit (v_0) und der Kapazität einer Strecke die Grundlage für eine realistische Abbildung der Strecken- und Routenfahrtzeiten in Verkehrsmodellen.

In der Theorie gibt es zahlreiche Ansätze, um den Verlauf der CR-Funktionen, also die Abhängigkeit der Geschwindigkeit (bzw. Fahrtzeit) von der Kapazitätsauslastung zu beschreiben. In der hier verwendeten Software PTV Visum sind verschiedene dieser Ansätze implementiert.

In der Verkehrsplanungspraxis und in Verkehrsmodellen werden vor allem CR-Funktionen ohne harte Abbildung der Leistungsfähigkeit eingesetzt, um einerseits eine Konvergenz des Modells und andererseits die Abbildung von Stausituationen zu ermöglichen. Bei einer fixen Leistungsfähigkeit und einer CR-Funktion mit Leistungsfähigkeitsgrenze würden die Stausituationen unvollständig abgebildet werden und somit ein unplausibles Routenwahlverhalten entstehen. Dadurch würde die Prognosefähigkeit des Verkehrsmodells stark beeinträchtigt. Aus diesem Grund werden die Funktionsverläufe auch beim Überschreiten der Kapazitätsgrenze fortgeschrieben und entsprechend der Warteschlangentheorie angepasst. Hier muss zusätzlich eine Plausibilisierung der Parameter entsprechend dem Routenwahlverhalten vorgenommen werden.

In einer kürzlich fertiggestellten Forschungsarbeit (Vrtic *et al.* 2018) wurden nach Streckentypen differenzierte Funktionstypen und deren Parametrisierung für die Abbildung von CR-Funktionen abgeleitet. Die Funktionen mit den kalibrierten Parametern dienen als Grundlagen für Reisezeitberechnungen in Verkehrsmodellen. Jene Ansätze, welche in dieser Forschungsarbeit untersucht und im Kanton Luzern angewendet wurden, werden im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

Die erweiterte BPR-Funktion (BPR-2-Funktion) ist eine modifizierte Version der BPR-Funktion, welche zwei Phasen abbildet, also eine unterschiedliche Steigung der Kurve im Unter- und Überlastbereich zulässt und somit eine flexiblere Schätzung erlaubt:

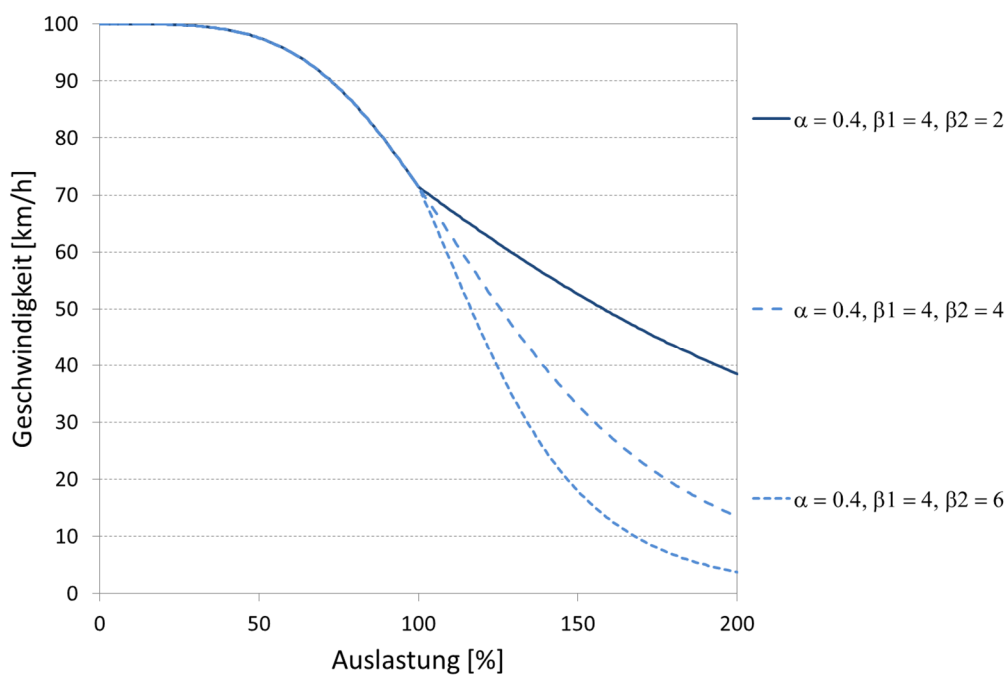
$$q < c: v = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^{\beta_1}}$$

$$q \geq c: v = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^{\beta_2}}$$

mit:	v	Geschwindigkeit auf belasteter Strecke
	v ₀	Geschwindigkeit auf unbelasteter Strecke
	q	Belastung der Strecke
	c	Kapazität der Strecke
	α, β ₁ , β ₂	Parameter der Funktion

Abbildung 8 zeigt den zusätzlichen Einfluss des Parameters β₂ auf den Verlauf der Kurve im Überlastbereich. Dieser erlaubt einen flexibleren Umgang mit den beiden massgebenden Phasen des Verkehrsflusses und kann somit zu einer genaueren Abbildung des reellen Verkehrsgeschehens im Modell führen.

Abbildung 8: Vergleich der Verläufe der BPR-2-Funktion für verschiedene β₂-Parameter



Die für im GVM LU verwendeten CR-Funktionen und deren Parameter für die verschiedenen Streckentypen sind in Abbildung 9 aufgeführt.

Abbildung 9: Visum: IV Einstellungen Parameter CR-Funktionen pro Streckentyp

IV-Einstellungen - CR-Funktionen										
Streckentypen										
	*0	*1	*2	*3	*4	*5	*6	*7	*8	*9
0*	10	10	9	9	10	9	9	9	9	9
1*	9	1	1	1	2	2	2	2	3	3
2*	9	9	5	5	5	5	9	9	9	9
3*	9	2	2	3	3	9	9	9	5	9
4*	9	5	5	5	7	7	7	7	9	9
5*	9	3	3	3	7	7	7	9	9	9
6*	9	3	3	7	7	9	9	9	9	9
7*	9	7	7	9	9	9	9	9	9	9
8*	9	7	7	7	7	9	9	9	9	9
9*	10	10	10	10	10	10	10	9	10	9
Kurve für selektierte Felder <input type="checkbox"/>										
<input checked="" type="checkbox"/> vMin für Streckentypen berücksichtigen										
CR-Funktion für prozentuale Anbindungen: BPR (1.00 3.00 1.00)										

CR-Funktionen					
Anzahl: 9	Nummer	Beschreibung			
1	1	BPR2 (0.27 2.57 5.93 1.00)			
2	2	BPR2 (0.23 2.16 5.35 1.00)			
3	3	BPR2 (0.31 2.69 4.98 1.00)			
4	5	BPR2 (0.18 5.00 3.44 1.00)			
5	6	BPR2 (0.18 2.64 5.20 1.00)			
6	7	BPR2 (0.16 2.48 6.01 1.00)			
7	8	BPR2 (0.05 5.00 4.52 1.00)			
8	9	konstant			
9	10	weich gesperrt			

6.5 Knotenpunkt widerstände

Für Knotenpunkte, an denen typischerweise Wartezeiten für Verkehrsteilnehmer auftreten, wurde unter Nutzung der vom Auftraggeber bereitgestellten GIS-Daten eine Knotentypisierung durchgeführt. Unterschieden werden plangleiche Bahnübergänge, Kreisverkehrsplätze, Auf-/Abfahrten an der Autobahn, vorfahrtgeregelte und lichtsinalgeregelte Knotenpunkte. Die Knotentypisierung wurde nur für Knoten vorgenommen, die innerhalb des Planungsraumes liegen. Im GVM LU werden folgende Knotentypen unterschieden:

Tabelle 4: Knotentypen Netzmodell

Hierarchiestufe	Beschreibung
00	zuschlagsfreie Knoten
10	LSA-geregelter Knoten
20	verkehrszeichengeregelter Knoten 4-armig
25	verkehrszeichengeregelter Knoten 3-armig
50	Kreisverkehr 4-armig
51	Kreisverkehr nicht vereinfacht
55	Kreisverkehr 3-armig
60	Auffahrten Autobahn
61	Abfahrten Autobahn
70	Rechts-vor-Links
80	plangleiche Bahnübergänge
90	Haltestellen

Knotentyp 70 wurde allen Knoten zugewiesen, bei denen alle Eingangsstrecken denselben Streckentyp haben (Erschliessungsstrassen und Sammelstrassen ausgeschlossen).

In Abhängigkeit des Knotentyps wurden unterschiedliche Methoden für die Berechnung der Abbiegezuschläge verwendet:

- LSA gesteuerte Knoten (Knotentyp 10)
 - Abbieger CR-Funktion
 - Knotenattribut „MethodeWidamKnoten“ = Abbieger CR-Funktion
- verkehrszeichengeregelter Knoten (Knotentypen 20 und 25) und Kreisverkehr (Knotentypen 50 und 55)
 - Knoten CR-Funktion
 - Knotenattribut „MethodeWidamKnoten“ = Knoten CR-Funktion
- übrige Knoten (Rechts-vor-Links und Auf-/Abfahrten)
 - belastungsunabhängige Zuschläge

Die Abbiegezeitzuschläge t_0 ergeben sich aus dem jeweiligen Knotentyp und der Rangfolge der sich kreuzenden Strassen (siehe Tabelle 5). Die Rangfolge ergibt sich in der Regel aus der Typisierung der Strecken im Netz. Sie sind im Netzmodell unter *Netz -> Abbiegerstandards* hinterlegt. Im Rahmen der Kalibrierung wurden die Werte angepasst und können punktuell von den Standardwerten abweichen.

Tabelle 5: Vorbelegung Abbiegezuschläge an Knoten

Knotentyp	Bezeichnung und Modellfunktion	Abbiegetypen											
		HS-HS (++)			HS-NS (+-)			NS-HS (-+)			NS-NS (--)		
		r	g	l	r	g	l	r	g	l	r	g	l
00	zuschlagsfreie Knoten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	LSA-geregelter Knoten	8	8	8	8	8	10	15	15	20	20	20	25
20	verkehrszeichengeregelter Knoten 4-armig	0	0	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5
25	verkehrszeichengeregelter Knoten 3-armig	0	0	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5
50	Kreisverkehr 4-armig	5	9	9	5	9	9	5	9	9	5	9	9
51	Kreisverkehr nicht vereinfacht	0	0	0	0	0	0	5	5	5	-	-	-
55	Kreisverkehr 3-armig	7	12	19	7	12	19	7	12	19	7	12	19
60	Auffahrten BAB	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5
61	Abfahrten BAB	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3
70	Rechts-vor-Links	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
80	(beschränkte) Bahnübergänge	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
90	Haltestellen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bypässe an Knotenpunkten wurden mit einem Zuschlag von 3 Sekunden gesondert behandelt.

Da das Modell keine Daten zu Fahrstreifenanzahl auf den Abbiegern und auch keine Daten zu Grünzeiten enthält, wurde die Kapazität aller Abbieger auf das Minimum aus der Kapazität der Eingangsstrecke und der Ausgangsstrecke des Abbiegers gesetzt. Bei Linksabbiegern wurde diese Kapazität nochmal auf die Hälfte reduziert. Für t_0 wird die Vorbelegung verwendet.

Um VISUM mitzuteilen, dass für die LSA-Knoten die Methode «Abbieger CR-Funktion» verwendet werden soll, muss das Attribut «MethodeWidAmKnoten» auf «Abbieger CR-Funktion» gesetzt werden. Die Parameter der CR-Funktion werden im Verfahrensdialo in der Funktion «Widerstände am Knoten» eingetragen. Dazu muss dort die Methode «Abbieger CR Funktion» ausgewählt werden. Verwendet wird der Funktionstyp «TModel_Nodes».

Da für vofahrtsgeregelte Knoten und Kreisel bei der Berechnung der Abbiegezuschläge weniger die Belastung des entsprechenden Abbiegers massgebend ist, sondern die Belastung vorhandener Konfliktströme, wird das Berechnungsverfahren «Knoten CR-Funktion» verwendet. Dabei wird der auf Knotenebene berechnete Zuschlag auf die betreffenden Abbieger übertagen.

Um VISUM mitzuteilen, dass für die vofahrtsgeregelten Knoten und Kreiseln die Methode «Knoten CR-Funktion» verwendet werden soll, muss bei Knotentyp 20, 25, 50 und 55 das Attribut «MethodeWidamKnoten» auf «Knoten CR-Funktion» gesetzt werden.

Die CR-Funktion für die Knoten wird im Verfahrensdialo, wie für die Abbieger auch, in der Funktion «Widerstände am Knoten» eingetragen. Allerdings muss für die vofahrtsgeregelten Knoten die Methode «Knoten CR-Funktion» gewählt werden.

7 ÖV-Angebot

Die wesentlichen Grundlagen für die Erstellung des Verkehrsangebots im ÖV sind der Datensatz Hafas 2017 und der Systemfahrplan 2017 der SBB. Das Verkehrsangebot wird im Analyse- und Prognosemodell fahrplanfein abgebildet. Die Hafas-Daten wurden über eine existierende Schnittstelle in VISUM eingelesen.

Die Implementierung des Verkehrsangebots beinhaltet die Abbildung von georeferenzierten Haltestellen, Schienennetz, Linien inkl. Routing am Strassennetz und Fahrpläne. Die Haltestellenkoordinaten in Hafas sind teilweise ungenau, daher wurden diejenigen des BAV übernommen.

Der Systemfahrplan 2017 wurde von der SBB bezogen und daraus das Modellgebiet herausgeschnitten. Das erstellte Teilnetz Schiene wurde danach zum MIV-Netz für das Planungsgebiet additiv dazu gelesen. Der Hafas-Fahrplan (ohne Züge) wurde für Dienstag, 16. Mai 2017, ein typischer Werktag ohne Schulferien im Planungsgebiet, in einer anderen Versionsdatei importiert.

Im Anschluss an den Importvorgang wurden die Hafas-Fahrplandaten und die einzelnen Kurse per Hand zu Linien, Linienrouten und Fahrzeitprofilen (mit denselben Ein- und Aussteigezulässigkeiten und Fahrzeiten) aggregiert, um eine Systematisierung der Linien (der Hafas-Datensatz hat keine Liniendefinition) zu erreichen. Diese Aggregation erhöht zum einen die Übersichtlichkeit des ÖV-Netzmodells, zum anderen wird beim Aufbau der Prognosenetze die Überarbeitung der Daten wesentlich vereinfacht und die Rechenzeit der fahrplanfeinen Umlegung sinkt.

Der Name der Verkehrsbetriebe wurde in Codeform im Liniennamen erwähnt, um die Übersicht beim Arbeiten zu verbessern (z.B. Verkehrsbetriebe Luzern, VBL). Für den Basisnetz 2017 sind insgesamt 802 Linien definiert.

Danach wurde wiederum das Teilnetz Modellgebiet gebildet und die darin enthaltenen Haltestellen und ÖV-Linien in die Versionsdatei Schienen- und Strassennetz importiert. Beim Importprozess erfolgt das Routen der Busse auf dem Strassennetz.

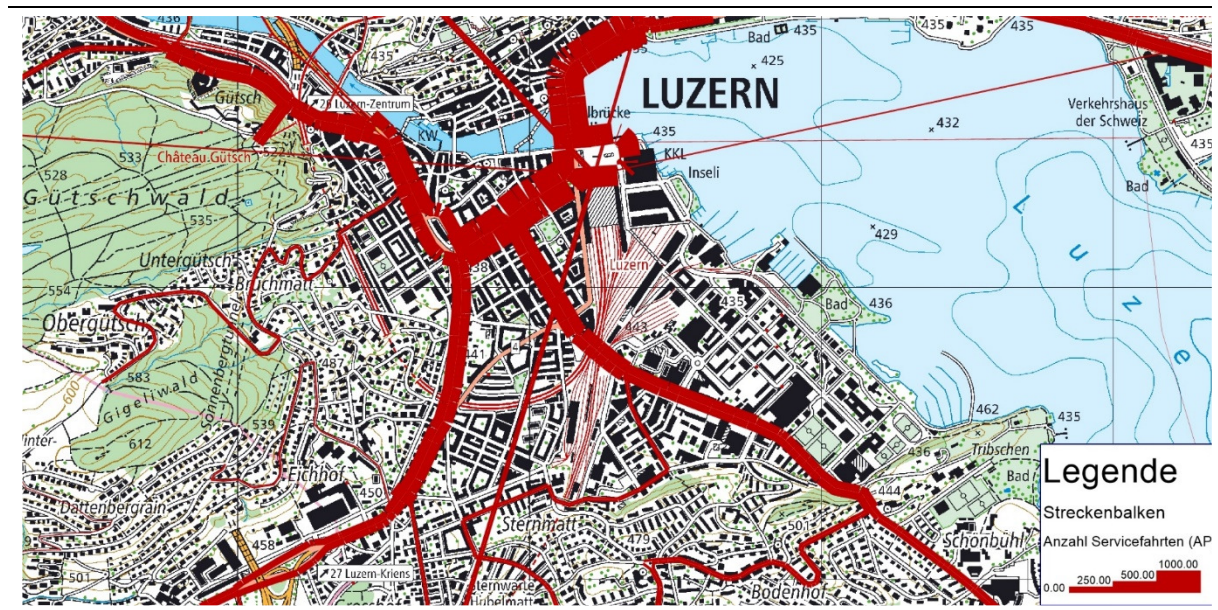
Zur Differenzierung im ÖV sind 7 Verkehrssysteme definiert:

- Bus (B) mit 614 Linien
- Zu Fuss (F)
- Funicular (FUN) mit 8 Linien
- Fernverkehr Zug (FV) mit 33 Linien
- Regionalverkehr Zug (RV) mit 85 Linien
- Schiff (Sch) mit 42 Linien
- Seilbahn (SeB) mit 20 Linien

In Summe gibt es 1'719 Haltestellen, welche von 802 Linien mit 16'605 Kursfahrten bedient werden.

In Abbildung 10 sind die Anzahl Servicefahrten (Kurse) im Basisjahr 2017 am integrierten Strassen- und Schienennetz in der Stadt Luzern dargestellt.

Abbildung 10: Stadt Luzern: Anzahl Servicefahrten 2017



8 Nachfragemodell 2017

Die Verkehrsnachfrage des GVM LU setzt sich aus folgenden Nachfragesegmenten zusammen:

- Personenverkehr:
 - Binnenverkehr;
 - Aussenverkehr;
- Strassengüterverkehr.

Im Personenverkehr werden alle vier Verkehrsmittel modelliert: Personenwagen, öffentlicher Verkehr, Velo- und Fussverkehr. Motorräder werden nicht separat aufgeführt, da für deren detaillierte Modellierung die entsprechenden Datengrundlagen (MZMV-Daten, Zähldaten, etc.) fehlen. Mit dem Verkehrsnachfragemodell (EVA) werden die Quelle-Ziel-Ströme innerhalb des Modellperimeters d.h. im Nachfrageperimeter vollständig generiert. Die Aussenströme, d.h. Quelle-Ziel-Ströme zwischen dem Nachfrageperimeter und den Aussenzonen sowie der Transitverkehr durch den Modellperimeter, werden aus dem nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) übernommen.

Im Strassengüterverkehr (SGV) werden die Fahrten als einzelne Matrizen abgebildet und nicht als fixe Vorbelastung auf dem Strassennetz betrachtet. Da bei fixen Vorbelastungen die Wirkung einer strassenseitigen Massnahme auf das Routenwahlverhalten beim SGV nicht modelliert werden kann, werden separate Matrizen aus dem Nationalen Güterverkehrsmodell erstellt. Anhand vorhandener Strukturdaten werden die Matrizen des Nationalen Güterverkehrsmodells auf die Zonierung des GVM LU disaggregiert und ergänzt. Im letzten Schritt werden diese Matrizen anhand der SGV-Zähldaten im Modellgebiet kalibriert. Durch die Umlegungen dieser Matrizen wird es möglich, den Einfluss des SGV auf das Routenwahlverhalten im MIV bei Modellanwendungen zu berücksichtigen. Die Segmentierung wird nach den drei SGV-Klassen Lieferwagen, Lastwagen sowie Last- und Sattelzüge differenziert.

Die Berechnung der Verkehrsnachfrage erfolgt mit dem in VISUM integrierten Tool EVA. Dies ist ein makroskopisches, simultanes Verkehrsnachfragemodell zur Berechnung von:

- Verkehrserzeugung – mit (nach Aktivitäten und Personengruppen) disaggregierten Quelle-Ziel-Gruppen und einem verhaltensorientierten Kennwertmodell;
- Verkehrsverteilung (Zielwahl) – mit differenzierter Berechnung von Bewertungswahrscheinlichkeiten (Nutzenfunktionen);
- Verkehrsaufteilung (Verkehrsmittelwahl, auch als Modal Split bekannt).

Die Ergebnisse der Berechnung sind die Fahrtenmatrizen der Verkehrsmittel Fuss, Velo, ÖV und MIV. Die Konkurrenz zwischen den Verkehrssystemen wird bei deren Erstellung berücksichtigt. Die Änderungen in einem Verkehrssystem wirken immer auch auf die Nachfrage der konkurrierenden Systeme. Für die verschiedenen Verkehrsmittel kann eine unterschiedliche Anzahl von Kenngrössen benutzt werden. So ist es z.B. üblich, für den ÖV die Beförderungszeit, die Zu- und Abgangszeit, den Takt, die Umsteigehäufigkeit, etc. zu verwenden.

Durch eine Differenzierung nach Aktivitäten entstehen 27 Quelle-Ziel-Gruppen (z.B. Wohnen-Arbeit, Wohnen-Einkauf, Arbeit-Einkauf, etc.; vollständige Auflistung siehe Tabelle 6). Für jede Quelle-Ziel-Gruppe werden separate Fahrtenmatrizen erstellt, welche später zu Fahrtzwecken sowie Gesamtmatrizen der einzelnen Verkehrsmittel zusammengefasst werden. Die Nachfrageberechnung erfolgt in mehreren Schritten:

- Erstellung und Eichung der Quelle-Ziel-Matrizen für den durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV);

- Ableitung der Quelle-Ziel-Matrizen für die Spitzenstundenmodelle (MSP und ASP) und für den Tagesverkehr (DTV);
- Eichung der Spitzenstundenmodelle und des DTV-Modells.

Die Nachfrageberechnung beinhaltet damit neben der Matrixerstellung und der Matrixplausibilisierung auch die Eichung auf die Querschnittszählungen, einschliesslich einer Plausibilisierung des Routenwahlverhaltens.

8.1 DWV-Modell

Basierend auf dem erstellten Verkehrsangebot und der Zonierung werden die nach Fahrtzwecken getrennten Quelle-Ziel-Matrizen im MIV, ÖV, Fuss- und Veloverkehr für den durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) erzeugt. Eine Quelle-Ziel-Matrix beinhaltet die Verkehrs- bzw. Quelle-Ziel-Ströme zwischen den Verkehrsmodellzonen. Ein Verkehrsstrom F_{ijk} gibt dabei an, wie viele Fahrten zwischen den Verkehrszellen i und j mit dem Verkehrsmittel k im gegebenen Zeitraum durchgeführt werden.

Die Erstellung von Matrizen erfolgt in vier Arbeitsschritten:

- Bestimmung des Verkehrspotentials: Verkehrserzeugung und Verkehrsanziehung der Zonen;
- Festlegung der Modellparameter für die Nachfrageverteilung und -aufteilung (Ziel- und Verkehrsmittelwahl);
- Berechnung der Quelle-Ziel-Matrizen und Validierung der Matrixstruktur;
- Kalibration der Matrixstruktur, mit Rückkoppelung.

Zur Bestimmung des Verkehrspotentials werden für die einzelnen Verkehrszellen eines Planungsraumes die einströmenden und die ausströmenden Verkehrsstärken als Summe der Zielverkehre (Z_i), respektive der Quellverkehre (Q_i) mit Hilfe von Raumstrukturdaten (oder Strukturdaten, vgl. Kapitel 5) bestimmt. Die Raumstrukturdaten charakterisieren dabei die Attraktivität der jeweiligen Verkehrszelle. Das Verkehrsaufkommen wird bestimmt, indem jedem Einwohner einer verhaltenshomogenen Gruppe eine gewisse Anzahl an Wegen für einen Fahrtzweck zugewiesen wird. Hierfür werden sogenannte Quelle-Ziel-Gruppen gebildet, welche zu Fahrtzwecken zusammengefasst werden. Es werden folgende Fahrtzwecke unterschieden:

- Arbeit;
- Ausbildung;
- Nutzfahrt;
- Einkauf;
- Freizeit.

Die Kennwerte zum spezifischen Verkehrsaufkommen pro Quelle-Ziel-Gruppe und verhaltenshomogener Gruppe werden auf Grundlage des MZMV 2015 ermittelt. Aus der gesamten Befragungsstichprobe werden die für den Modellperimeter relevanten Beobachtungen herausgefiltert.

Für die Verteilung und Aufteilung der Verkehrsnachfrage wurde ein simultanes Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodell verwendet (Weis *et al.*, 2017), das die räumliche und modale Konkurrenz angemessen abbildet. Die Schätzungen wurden getrennt für die Verkehrszwecke Pendler, Nutzfahrt, Einkauf, Freizeit und Sonstiges durchgeführt. Die ermittelten Parameter dienen als Input für die Berechnung der Verkehrsnachfrage nach Verkehrsmitteln für die einzelnen Verkehrsbeziehungen. Dafür wird das Nachfragemodell EVA verwendet, welches Nested-Logit (NL) Modelle umsetzen kann. Mit diesem Programm werden sowohl die ÖV- als auch die MIV- und Fuss- und Velo-Quelle-Ziel-Matrizen erstellt. Da

in der Realität sowohl Ziel- als auch Verkehrsmittelwahl-Entscheidungen unter Berücksichtigung alternativer Verkehrsmittel getroffen werden, kann die Verkehrsverteilung nur unter Berücksichtigung alternativer Verkehrsmittel konsistent und plausibel modelliert werden. Daher können die Quelle-Ziel-Matrizen der einzelnen Verkehrsträger nur simultan erstellt werden. Für jede Quelle-Ziel Gruppe werden vollständige Matrizen erstellt, welche sowohl interzonale (Wege zwischen zwei Zonen) und intrazonale (Wege beginnen und enden innerhalb derselben Zone) Wege beinhalten. Insgesamt werden mit EVA 108 Matrizen (27 Quell-Ziel-Gruppen x 4 Verkehrsmittel) erstellt, die in einem weiteren Schritt zu Fahrtzwecken aggregiert werden.

Die Matrizen werden anschliessend mit vorhandenen Erhebungsdaten aus dem MZMV 2015 überprüft.

8.1.1 Erzeugungsmodell

Als erster Baustein des Nachfragemodells wird das gesamte Verkehrsaufkommen der Zonen ermittelt, unterteilt nach Verkehrserzeugung (Produktionsaufkommen oder Quellverkehrsaufkommen) und Verkehrsanziehung (Attraktionsaufkommen oder Zielverkehrsaufkommen). Das Verkehrsaufkommen einer Zone ist vor allem von der Flächennutzung, den Strukturdaten (wie z.B. Einwohnerzahlen, Arbeitsplätze, Schüler, Verkaufsflächen, Freizeiteinrichtungen, etc.), den soziodemographischen Merkmalen (z.B. Altersstruktur, PW-Besitz oder ÖV-Abonnemente) und der Lagegunst bzw. Erschliessungsqualität der Zone abhängig. Dabei sind die Strukturdaten und die soziodemographischen Charakteristiken, die das Verkehrsverhalten beschreiben, die entscheidenden Merkmale. Bei einer entsprechenden Segmentierung der Strukturdaten und des spezifischen Verkehrsaufkommens bzw. der Erzeugungsraten, lassen sich die räumlichen und die das Verkehrsverhalten beschreibenden Charakteristiken der Zone, durch die berechnete Verkehrserzeugung bzw. Verkehrsanziehung quantifizieren.

Die hier verwendete Methodik für die Verkehrserzeugung basiert auf dem EVA Modell von Lohse (Schnabel und Lohse, 1997), welches in der Software EVA implementiert ist. Mit diesem Software-Tool werden die ersten drei Modellstufen (Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung) berechnet. Es wird versucht, reales Verkehrsverhalten von Menschen in Verkehrssystemen weitgehend adäquat nachzubilden. Der Modellansatz gehört zu den disaggregierten, makroskopischen Gruppenverhaltens- und Verkehrsstrommodellen. Die Modellierung des Verkehrsgeschehens erfolgt separat für jede verhaltenshomogene Personengruppe sowie jeden Fahrtzweck. Die konkreten Bedingungen des Raum-Zeit-Systems werden eingehalten. Die Abbildung des zu erwartenden mittleren Verkehrsgeschehens geschieht durch speziell abgeleitete und begründete mathematische Algorithmen sowie Wahrscheinlichkeitsaussagen bezüglich der Aktivitäten der verhaltenshomogenen Personengruppen mit ihren typischen Merkmalen.

Das Erzeugungsmodell wird in EVA über so genannte Primär- und Sekundärdatenbanken berechnet. Die Primärdatenbank beinhaltet Strukturdaten und Attraktionsvariablen. Das spezifische Verkehrsaufkommen wird für die einzelnen Quelle-Ziel-Gruppen separat gespeichert. Aus diesen Informationen wird die Sekundärdatenbank zur Berechnung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen erstellt. In diesem Projekt wird das Verkehrsaufkommen für einen durchschnittlichen Werktag berechnet. Die Auswahl der betrachteten Strukturgrößen steht in engem Zusammenhang mit der Einteilung in Quelle-Ziel-Gruppen. Wesentlich ist eine Zerlegung der Menge aller Verkehrsteilnehmer in weitgehend elementare und homogene Schichten (Personengruppen bzw. Bezugspersonengruppen). Jeder Quelle-Ziel-Gruppe sind eine oder mehrere Personengruppen als „massgebende Bezugspersonengruppen“ zugeordnet.

Das Verkehrsaufkommen wird für die einzelnen Quelle-Ziel-Gruppen getrennt berechnet und erst für den Arbeitsschritt „Umlegung“ wieder zusammengefügt. Es wird zwischen drei Typen von Quelle-Ziel-Gruppen unterschieden:

- Typ 1: Beginn (Quelle) der Ortsveränderung am «Heimatstandort»;
- Typ 2: Ende (Ziel) der Ortsveränderung am «Heimatstandort»;
- Typ 3: Beginn und Ende der Ortsveränderung nicht am «Heimatstandort».

Der „Heimatstandort“ kann dabei die eigene Wohnung (1. Priorität) oder die eigene Arbeitsstätte (2. Priorität) sein.

Grundlage für die Einteilung der Quelle-Ziel-Gruppen bilden die Aktivitäten, die jeweils am Quell- oder Zielort von Personen durchgeführt werden und die mit der betrachteten Ortsveränderung im Zusammenhang stehen. Aus der Kombination dieser Aktivitäten und teilweiser Aggregation ergeben sich insgesamt 27 Quelle-Ziel-Gruppen, die in Tabelle 6 dargestellt sind. Der Gruppen-Typ jeder Quelle-Ziel-Gruppe ist in Klammern aufgeführt. Für jede Quelle-Ziel-Gruppe wurden entsprechende Strukturdaten und Erzeugungsraten definiert.

Tabelle 6: Definition der Quelle-Ziel-Gruppen (QZG)

		W	A	BS	BU	N	Ek	El	Bg	Fk	Fl	
Wohnung	W		WA (1)	WBS (1)	WBU (1)	WN (1)	WEk (1)	WEI (1)	WBg (1)	Wfk (1)	WFI (1)	
Arbeit	A	AW (2)		AS (1)								
Ausbildung Schule	BS	BSW (2)	SA (2)	BS (1)								
Ausbildung Universität	BU	BUW (2)										
Nutzfahrt	N	NW (2)		SB (2)				NS (1)				
Einkauf kurzfristig	Ek	EkW (2)						SN (2)				ES (1)
Einkauf langfristig	El	ElW (2)	SE (2)				SS (3)					
Begleitung	Bg	BgW (2)										
Freizeit kurz	Fk	FkW (2)	SS (3)									
Freizeit lang	Fl	FlW (2)										

Durch die Bildung von Quelle-Ziel-Gruppen werden die wesentlichen Verkehrsnachfrage- bzw. Verkehrsmarktsegmente im Personenverkehr berücksichtigt. Sie können weiter differenziert werden und sind für Marktanalysen und -prognosen bzw. verkehrsplanerische Verkehrsnachfrageberechnungen unerlässlich.

Die Bestimmung der Verkehrsaufkommen Q_i und Z_j sowie der Verkehrsströme v_{ij} bzw. v_{ijk} zwischen den Quellen i und Zielen j mit dem Verkehrsmittel k ist stets getrennt nach den Marktsegmenten bzw.

Quelle-Ziel-Gruppen durchzuführen, um systematische Fehler zu vermeiden. Durch die Quelle-Ziel-Gruppen-Einteilung wird der Personenverkehr in weitgehend elementare und homogene Teilmengen zerlegt, die folgende Merkmale enthalten:

- einen räumlich-funktionellen Bezug der Quellen und Ziele der Ortsveränderungen zur Flächennutzung;
- einen soziodemographischen Bezug zu wesentlichen Personengruppen;
- einen verkehrssoziologischen Bezug zum Verkehrsgeschehen (Mobilitätsanforderungen).

So ist für die Quelle-Ziel-Gruppen Wohnen-Arbeit (WA) und Arbeit-Wohnen (AW) allein die Bezugspersonengruppe „Erwerbstätige“, die allerdings in weitere Untergruppen zerlegt werden kann, massgebend, während für die Quelle-Ziel-Gruppen Wohnen-Einkauf (WE) und Einkauf-Wohnen (EW) im Allgemeinen alle Personengruppen berücksichtigt werden können. Die Grössen aller massgebenden Personengruppen in den einzelnen Zonen bilden einen Teil der Strukturgrössen, welche für die Betrachtung einer bestimmten Quelle-Ziel-Gruppe wesentlich sind. Weitere massgebende Strukturgrössen werden durch die Aktivitäten an den Quellen oder Zielen festgelegt. Die Zuordnung der massgebenden Strukturgrössen zu den einzelnen Quelle-Ziel-Gruppen ist in Tabelle 7 dargestellt. Massgebend sind diejenigen Strukturgrössen, welche die von Personen durchgeführten Ortsveränderungen verursachen. Somit sind die in Kapitel 5 beschriebenen Strukturdaten für die nachfolgend erläuterte Berechnung der Erzeugungsraten von grosser Bedeutung.

Tabelle 7: Quelle-Ziel-Gruppen (QZG) und massgebende Strukturgrössen

QZG	Quelle-Ziel-Gruppe	Fahrtzweck	Strukturgrösse (SQi) der Quell-Verkehrsmodellzone Qi	Strukturgrösse (SZj) der Ziel-Verkehrsmodellzone Zj
WA	Wohnen – Arbeit	Arbeit	Erwerbstätige	Beschäftigte
WBS	Wohnen – Ausbildung Schule	Ausbildung	Schüler am Wohnort	Ausbildungsplätze Schüler
WBU	Wohnen – Ausbildung Universität	Ausbildung	Studenten am Wohnort	Ausbildungsplätze Studenten
WEk	Wohnen – Einkauf kurzfristig	Einkauf	Einwohner nach Altersklasse	Verkaufsflächen kurzfristiger Bedarf
WEI	Wohnen – Einkauf langfristig	Einkauf	Einwohner nach Altersklasse	Verkaufsflächen langfristiger Bedarf
WN	Wohnen – Nutzfahrt	Nutzfahrt	Erwerbstätige	Beschäftigte
WBg	Wohnen – Begleitung	Nutzfahrt	Einwohner nach Altersklasse	Einwohner, Ausbildungsplätze Schüler, Freizeitbesucher

QZG	Quelle-Ziel-Gruppe	Fahrtzweck	Strukturgrösse (SQi) der Quell-Verkehrsmodellzone Qi	Strukturgrösse (SZj) der Ziel-Verkehrsmodellzone Zj
WFk	Wohnen – Freizeit kurz	Freizeit	Einwohner nach Altersklasse	Einwohner, Verkaufsflächen, Freizeitbesucher
WFI	Wohnen – Freizeit lang	Freizeit	Einwohner nach Altersklasse	Einwohner, Verkaufsflächen, Freizeitbesucher, Fluggäste
AW	Arbeit – Wohnen	Arbeit	Beschäftigte	Erwerbstätige
BSW	Ausbildung Schule – Wohnen	Ausbildung	Ausbildungsplätze Schüler	Schüler
BUW	Ausbildung Universität – Wohnen	Ausbildung	Ausbildungsplätze Studenten	Studenten
EkW	Einkauf kurzfristig – Wohnen	Einkauf	Verkaufsflächen kurzfristiger Bedarf	Einwohner nach Altersklasse
EIW	Einkauf langfristig – Wohnen	Einkauf	Verkaufsflächen langfristiger Bedarf	Einwohner nach Altersklasse
NW	Nutzfahrt – Wohnen	Nutzfahrt	Beschäftigte	Erwerbstätige
BgW	Begleitung – Wohnen	Nutzfahrt	Einwohner, Ausbildungsplätze Schüler, Freizeitbesucher	Einwohner nach Altersklasse
FkW	Freizeit kurz – Wohnen	Freizeit	Einwohner, Verkaufsflächen, Freizeitbesucher	Einwohner nach Altersklasse
FIW	Freizeit lang – Wohnen	Freizeit	Einwohner, Verkaufsflächen, Freizeitbesucher, Fluggäste	Einwohner nach Altersklasse
AS	Arbeit – Sonstiges	Arbeit	Beschäftigte	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsflächen, Freizeitbesucher
SA	Sonstiges – Arbeit	Arbeit	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsflächen, Freizeitbesucher	Beschäftigte
BS	Bildung – Sonstiges	Ausbildung	Ausbildungsplätze Schüler, Ausbildungsplätze Studenten	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsflächen, Freizeitbesucher

QZG	Quelle-Ziel-Gruppe	Fahrtzweck	Strukturgrösse (SQi) der Quell-Verkehrsmodellzone Qi	Strukturgrösse (SZj) der Ziel-Verkehrsmodellzone Zj
SB	Sonstiges – Bildung	Ausbildung	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsf lächen, Freizeitbesucher	Ausbildungsplätze Schüler, Ausbildungsplätze Studenten
ES	Einkauf – Sonstiges	Einkauf	Verkaufsf lächen	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsf lächen, Freizeitbesucher
SE	Sonstiges – Einkauf	Einkauf	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsf lächen, Freizeitbesucher	Verkaufsf lächen
NS	Nutzfahrt – Sonstiges	Nutzfahrt	Beschäftigte	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsf lächen, Freizeitbesucher
SN	Sonstiges – Nutzfahrt	Nutzfahrt	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsf lächen, Freizeitbesucher	Beschäftigte
SS	Sonstiges – Sonstiges	Freizeit	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsf lächen, Freizeitbesucher	Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsf lächen, Freizeitbesucher

Die Erzeugungsraten (oft auch spezifische Verkehrsaufkommen genannt) werden für jede Quelle-Ziel-Gruppe und jede massgebende Strukturgrösse festgelegt bzw. geschätzt. Erzeugungsraten sind definiert als die Anzahl an Ortsveränderungen pro Tag und Einheit der Strukturgrösse. Sie werden berechnet aus der Anzahl an Wegen, die in einer Quelle-Ziel-Gruppe durch die Strukturgrössen verursacht werden, geteilt durch die Zahl der massgebenden Strukturgrössen der Quelle-Ziel-Gruppe. Dabei müssen die Erzeugungsraten so kalibriert werden, dass die Summe der Quellaufkommen gleich der Summe der Zielaufkommen ist. Weiterhin muss zwischen den Quell- und Zielverkehrsaufkommen von zwei gegensätzlichen Quelle-Ziel-Gruppen, z.B. WA und AW, vollständige Konsistenz erreicht werden. Das bedeutet in diesem Beispiel, dass sichergestellt werden muss, dass das Quellaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppe WA gleich dem Zielaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppe AW ist.

Für das Quellaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppen des Typs 1 und das Zielaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppen des Typs 2 werden die Erzeugungsraten aus dem MZMV 2015 abgeleitet. Bei der Festlegung der Erzeugungsraten der Zielaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppen des Typs 1 und der Quellaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppen des Typs 2 wird im nächsten Schritt sichergestellt, dass die oben genannten Konsistenz- und Summenbedingungen eingehalten werden. Zudem müssen die Erzeugungsraten für die Strukturdaten der Zone plausibel sein. Damit wird das gesamte Quellaufkommen des Untersuchungsgebiets in Abhängigkeit der Unterschiede bei den Attraktionsvariablen zwischen den Zonen aufgeteilt. Für die Quelle-Ziel-Gruppen des Typs 3 (nicht wohnungsgebundene Wege) wurde eine Gewichtung der Strukturgrössen definiert. Für diese Gewichtung werden bei fehlenden Erhebungsdaten die Erfahrungswerte verwendet (siehe FGSV, 2006).

Die resultierenden Erzeugungsraten sind, geordnet nach Quelle-Ziel-Gruppen, in Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8: Erzeugungsraten nach Quelle-Ziel-Gruppe (QZG)

QZG	Erwerbs- tätige	Schüler	Studenten	EW < 18	EW 18 - 24	EW 25 - 44	EW 45 - 64	EW 65 - 74	EW > 74
W-A	0.63								
A-W									
W-BS		0.99							
BS-W									
W-BU			0.63						
BU-W									
W-Ek				0.10	0.11	0.24	0.29	0.36	0.48
Ek-W									
W-El				0.03	0.05	0.07	0.07	0.11	0.09
El-W									
W-N	0.06								
N-W									
W-Bg				0.03	0.06	0.15	0.09	0.06	0.06
Bg-W									
W-Fk				0.51	0.29	0.26	0.27	0.42	0.42
Fk-W									
W-FI				0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
FI-W									
A-S	0.22								
S-A									
B-S		0.15	0.15						
S-B									
E-S				0.03	0.08	0.09	0.10	0.13	0.14
S-E									
N-S	0.02								
S-N									
S-S				0.06	0.13	0.08	0.07	0.14	0.09

Die Erzeugungsraten besagen, dass gemäss MZMV 2015 durchschnittlich:

- 1.54 Arbeitswege pro Erwerbstätigem und Werktag;
- 1.67 Ausbildungswege pro Auszubildendem und Werktag;
- 0.15 Nutzfahrtwege pro Erwerbstätigem und Werktag;
- 0.79 Einkaufswege pro Einwohner und Werktag;
- 0.96 Freizeitwege pro Einwohner und Werktag

zurückgelegt werden. Insgesamt werden durchschnittlich 3.19 Wege pro Werktag und Einwohner durchgeführt.

Die Differenzierung nach Quelle-Ziel-Gruppen und das beschriebene Vorgehen ermöglichen im Rahmen von Verkehrsprognosen die Berechnung der Auswirkungen von Angebots- und Verhaltensänderungen unter Berücksichtigung von Veränderungen aller hier einbezogenen Einflussgrössen. Die Veränderungen von Siedlungs- und soziodemographischen Charakteristiken und die sich daraus ergebenden Nachfrageveränderungen können damit im Erzeugungsmodell vollständig berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt werden für jede Quelle-Ziel-Gruppe aus den massgebenden Strukturdaten und den Erzeugungsraten die Quell- und Zielverkehrsaufkommen berechnet. Dies erfolgt für jede Quelle-

Ziel-Gruppe c stufenweise. Zunächst wird die Anzahl der durch die Bezugspersonen r der Verkehrsbezirke verursachten Ortsveränderungen bzw. das Quellverkehrsaufkommen (Verkehrsproduktion) nach folgenden Formeln ermittelt:

QZG c des Typs 1 mit quellseitig heimgebundenen Ortsveränderungen:

$$Q_e^c = \sum_r SV_{er}^c \cdot BP_{er}^c \cdot u_{er}^c \quad V = \sum_e Q_e^c = \sum_e \sum_r SV_{er}^c \cdot BP_{er}^c \cdot u_{er}^c$$

QZG c des Typs 2 mit zweiseitig heimgebundenen Ortsveränderungen:

$$Z_e^c = \sum_r SV_{er}^c \cdot BP_{er}^c \cdot u_{er}^c \quad V = \sum_e Z_e^c = \sum_e \sum_r SV_{er}^c \cdot BP_{er}^c \cdot u_{er}^c$$

QZG c des Typs 3 mit nicht heimgebundenen Ortsveränderungen:

$$V^c = \sum_e \sum_r SV_{er}^c \cdot BP_{er}^c \cdot u_{er}^c$$

- Q Quellverkehrsaufkommen
- Z Zielverkehrsaufkommen
- V Gesamtverkehrsaufkommen
- c Index für Quelle-Ziel-Gruppe (QZG)
- e Index für Verkehrsbezirke
- r Index für Personengruppen
- SV Spezifisches Verkehrsaufkommen (Mobilitätsrate oder Erzeugungsraten) der Bezugsperson BP für die betrachtete QZG c in [OV/(Pers., Zeiteinheit)]
- BP Anzahl der Personen in der massgebenden Bezugspersonengruppe p
- u Binnenverkehrsanteil (Faktor, der angibt, wie hoch der Anteil der Ortsveränderungen ist, welcher das betrachtete Untersuchungsgebiet verlässt)

Im nächsten Schritt wird das Gesamtverkehrsaufkommen V auf die nicht heimgebundenen Zielverkehrsaufkommen und/oder auf die nicht heimgebundenen Quellverkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke „konkurrierend“ je nach „Verkehrattraktion“ aufgeteilt. Dafür wird zunächst das Attraktions-/Strukturpotential SP_e^c des jeweiligen Verkehrsbezirkes e bestimmt und anschliessend das Verkehrsaufkommen für harte und weiche Randsummenbedingungen (RSB) ermittelt.

$$SP_e^c = \sum_s ER_{es}^c \cdot SG_{es}^c \cdot v_{es}^c \quad SP_{max_e}^c = \sum_s \ddot{U}_{es}^c \cdot ER_{es}^c \cdot SG_{es}^c \cdot v_{es}^c$$

- ER Erzeugungsrate pro Strukturgrösse
- SG Strukturgrösse
- V Gesamtverkehrsaufkommen

Bei harten Randsummenbedingungen ergibt sich das Verkehrsaufkommen direkt aus den Strukturpotentialen. Die Lagegunst spielt für die Bestimmung der Verkehrsaufkommen keine Rolle. Dies trifft für diejenigen Quelle-Ziel-Gruppen zu, bei denen „Pflichtaktivitäten“ realisiert werden (Arbeit, Schule, etc.).

Bei weichen Randsummenbedingungen nimmt die konkurrierende Lagegunst zusätzlich Einfluss auf die Grösse der Verkehrsaufkommen. Allerdings können die maximal möglichen Verkehrsaufkommensmengen – trotz sehr guter Erreichbarkeit – nicht überschritten werden (z.B. beim Einkaufsverkehr bei den Einkaufsstätten). Die „weichen“ Verkehrsaufkommen können erst mittels des Modellschritts Verkehrsverteilung/Verkehrsaufteilung bestimmt werden.

Offene Randsummenbedingungen realisieren sich ebenfalls erst im Zusammenhang mit der Verkehrsverteilung/Verkehrsaufteilung. Die Verkehrsaufkommen sind von der gemeinsamen Wirkung der Attraktionspotentiale und der Lagegunst abhängig. Restriktive Randsummenbedingungen wirken nicht (= „offene“ RSB). Die Bestimmung der Attraktionspotentiale entspricht der Vorgehensweise bei harten Randsummenbedingungen.

Das erzeugte Verkehrsaufkommen gilt zunächst allgemein für alle Verkehrsmittel gemeinsam, wenn nicht a priori eine Einschränkung vorgenommen wurde. Wie gross die einzelnen Aufkommen der Verkehrsmittel der Verkehrsbezirke sind, ergibt sich erst im Modellschritt Verkehrsverteilung/Verkehrsaufteilung aus den konkurrierenden Angeboten der Verkehrsmittel.

Im Erzeugungsmodell wird nur das Verkehrsaufkommen der im Untersuchungsgebiet vorhandenen Struktur- und Attraktionsgrössen ermittelt. Der Verkehr von ausserhalb des Modellperimeters wohnhaften Personen (Aussenverkehr) wird nicht berücksichtigt. Dieser Verkehr wird aus dem Nationalen Personenverkehrsmodell übernommen.

Durch die Zuordnung des Verkehrsaufkommens der Quelle-Ziel-Gruppen zu den einzelnen Fahrtzwecken werden die Fahrtzweckanteile ermittelt und mit den Ergebnissen des MZMV 2015 verglichen. Das Ergebnis ist in Tabelle 9 dargestellt. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass in den Zonen innerhalb des Modellperimeters des GVM LU an einem durchschnittlichen Werktag insgesamt 2.11 Millionen Wege erzeugt werden. Daraus ergibt sich ein spezifisches Verkehrsaufkommen von 3.18 Wegen pro Person (für den Binnenverkehr innerhalb des Modellperimeters, ohne Aussenverkehr). Damit stimmen die anhand der Verkehrsaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppen ermittelten Fahrtzweckanteile gut mit den Ergebnissen des MZMV 2015 überein.

Tabelle 9: Vergleich der ermittelten Fahrtzweckanteile (Binnenzonen) mit dem MZMV 2015

	Berechnete Wege [Mio./Werktag]	Anteil der berechneten Wege [%]	Anteil der Wege im MZMV 2015 [%]	Differenz
Arbeit	0.64	30.3	30.3	-0.02
Ausbildung	0.22	10.4	10.9	-0.44
Einkauf	0.54	25.5	25.2	+0.23
Nutzfahrt	0.18	8.5	8.5	+0.02
Freizeit	0.54	25.4	25.1	+0.21
Total	2.11			

8.1.2 Modellparameter

Die durch die Verkehrserzeugung berechneten Quell- und Zielverkehrsaufkommen werden im nächsten Schritt auf die Verkehrsmittel und die Zonen verteilt. Ziel der dazu verwendeten Modelle der Verkehrsverteilung und -aufteilung ist die Ermittlung der Verkehrsströme v_{ijk} zwischen allen möglichen Quellen i und Zielen j mit den Verkehrsmitteln k . Dafür müssen zunächst die Gesetzmässigkeiten der Verkehrsverteilung (Zielwahl) und Verkehrsaufteilung (Verkehrsmittelwahl) bestimmt werden. Da die Zielwahl auch von der Verkehrsmittelverfügbarkeit und dem Verkehrsangebot abhängig ist, können diese zwei Modellschritte nicht getrennt behandelt werden. Bei einem sequentiellen Verfahren kann eine Rückkoppelung stattfinden, was zu einer sehr komplexen Modellstruktur und zumeist auch nicht zu einer konsistenten Lösung führen würde. Daher werden in diesem Projekt die Quelle-Ziel-Matrizen mit Hilfe eines simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodells erstellt. Dieser Abschnitt beschreibt im Folgenden die Struktur dieses Modells sowie das Vorgehen zur Ermittlung der Modellparameter.

Zur Modellierung der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl wird ein Nested-Logit-Modell angewandt. Das Nested-Logit-Modell stellt neben dem Multinomialen-Logit-Modell das populärste und am häufigsten angewandte Modell der Logitfamilie dar. Es wird auch „strukturiertes“, „sequentielles“, „tree“ oder „hierarchisches“ Modell genannt (Ortuzar und Willumsen, 2001). Das Nested-Logit-Modell erlaubt die Modellierung von mehrstufigen Entscheidungen durch die Bildung von Untergruppen von Entscheidungsalternativen, den sogenannten Nestern. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wird auf der oberen Ebene das Verkehrsmittel (M für Mode) für eine Fahrt ausgewählt und auf der unteren Ebene wird die Entscheidung bezüglich des Ziels (D für Destination) gefällt. Eine Alternative besteht dabei immer aus der Kombination eines Ziels mit einem Verkehrsmittel. Die Alternativmenge besteht aus vier Nestern, eines für jedes Verkehrsmittel, und jedes Nest enthält elf Zielwahlalternativen. Somit sind in diesem Beispiel insgesamt 44 Ziel-Verkehrsmittel-Kombinationen gegeben, von denen eine die tatsächlich gewählte Alternative ist. Die theoretischen Grundlagen, sowie weitere Details zum Nested-Logit Modell, können aus Weis et al. (2012) entnommen werden.

Die Berechnung der Entscheidung bzw. der Wahl der Ziel-Verkehrsmittelwahl-Kombination erfolgt anhand der ermittelten Nutzendifferenz zwischen den Alternativen. Dafür wird eine dreistufige Nutzenfunktion mit soziodemographischen, Verkehrsmittel- und Attraktionscharakteristiken erstellt. Die folgenden Einflussfaktoren werden berücksichtigt:

- PW-Verfügbarkeit, Besitz von ÖV-Abonnements (GA, Verbund-Abos und Halbtax), Alter;
- MIV-Reisezeit, MIV-Kosten, ÖV-Reisezeit, ÖV-Kosten, Umsteigehäufigkeit, Takt, Zu- und Abgangszeit, Fuss-Reisezeit, Velo-Reisezeit;
- Einwohnerzahl, Erwerbstätige, Arbeitsplätze, Ausbildungsplätze, Freizeiteinrichtungen, Verkaufsflächen, Parkplatzangebot, Parkkosten, Zonenlage (Höhe).

Die Modellschätzungen basieren auf dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015 (Bundesamt für Raumentwicklung und Bundesamt für Statistik 2017), den Stated-Preference-Befragungen 2015 sowie den in vorherigen Arbeitsschritten erstellten Netzmodellen. Berücksichtigt werden aus dem MZMV 2015 alle Binnenwege der innerhalb des Modellperimeters wohnhaften Personen. Die Wege mit geokodierten Quell- und Zielpunkten wurden mit Zonengrenzenlayer des GVM verschnitten und so den Modellzonen zugeordnet.

Die Schätzung des Verkehrsmittelwahlmodells (Weis et al. 2017) erfolgt anhand der Ergebnisse der SP-Befragungen 2015 und des MZMV 2015. Es wurde jeweils ein fahrtzweckspezifisches Modell für die folgenden vier Fahrtzwecke geschätzt: Pendler, Nutzfahrt, Einkauf und Freizeit. Aufgrund der zu kleinen Stichprobe im GVM LU wurden die Parameter des GVM AG übernommen, da der grösste Teil

des Perimeters des GVM LU im Perimeter des GVM AG enthalten ist. In Tabelle 10 sind die verwendeten Parameter aufgeführt:

Tabelle 10: Modellparameter Verkehrsmittel- und Zielwahl

		Alle	Wohnen/Arbeit	Wohnen/Bildung	Wohnen/Einkauf	Wohnen/Nutzfahrt	Wohnen/Begleiten	Wohnen/Freizeit	Sonstiges/Arbeit	Sonstiges/Bildung	Sonstiges/Einkauf	Sonstiges/Nutzfahrt	Sonstiges/Freizeit
gemeinsam	Gewichtung Attraktionsgrösse				0.300			0.250					
	Steuerung Fk							-1.000					
	Steuerung Fl							-1.000					
Fuss	Alter linear	1.030											
	Alter quadratisch	-0.109											
	Höhe		-0.021	-0.003	-0.009	-0.014	-0.025	-0.025	-0.021	-0.003	-0.009	-0.014	-0.025
	Reisezeit		-0.087	-0.087	-0.133	-0.202	-0.202	-0.040	-0.087	-0.087	-0.133	-0.202	-0.040
Velo	Alter linear	0.601											
	Alter quadratisch	-0.079											
	Höhe		-0.004	-0.004	-0.012	-0.015	-0.013	-0.013	-0.004	-0.004	-0.014	-0.015	-0.013
	Reisezeit		-0.057	-0.057	-0.108	-0.091	-0.091	-0.045	-0.057	-0.057	-0.108	-0.091	-0.045
PW	Reisezeit		-0.065	-0.080	-0.049	-0.052	-0.052	-0.041	-0.065	-0.080	-0.049	-0.052	-0.041
	Kosten		-0.199	-0.199	-0.186	-0.078	-0.078	-0.169	-0.199	-0.199	-0.186	-0.078	-0.169
	Parkkosten		-0.123	-0.123	-0.288	-0.125	-0.125	-0.099	-0.123	-0.123	-0.288	-0.125	-0.099
	Parksuchzeit	-0.075											
	PW-Verfügbarkeit	1.140											
OEV	Alter linear	0.379											
	Alter quadratisch	-0.034											
	Anzahl Umsteigevorgänge		-0.217	-0.303	-0.321	-0.652	-0.652	-0.255	-0.217	-0.303	-0.321	-0.652	-0.255
	GA-Anteil	2.170											
	Halbtax-Anteil	0.248											
	Reisezeit		-0.046	-0.046	-0.038	-0.020	-0.020	-0.034	-0.046	-0.046	-0.038	-0.020	-0.034
	Kosten		-0.199	-0.199	-0.186	-0.078	-0.078	-0.169	-0.199	-0.199	-0.186	-0.078	-0.169
	Takt		-0.013	-0.015	-0.015	-0.037	-0.037	-0.001	-0.013	-0.015	-0.015	-0.037	-0.001
	Verbundabo-Anteil	2.380											
Zu- und Abgangszeit		-0.062	-0.083	-0.060	-0.055	-0.055	-0.033	-0.062	-0.083	-0.060	-0.055	-0.033	

8.1.3 Matrixerstellung: Vorgehen

Anhand der in der Verkehrserzeugung ermittelten Quell- und Zielverkehrsaufkommen, der Angebots- und Attraktionsdaten sowie der geschätzten Modellparameter werden in einem weiteren Schritt mit EVA die Quelle-Ziel-Matrizen bzw. die Verkehrsströme für die vier betrachteten Verkehrsmittel MIV, ÖV, Fuss und Velo erstellt. Um von den in der Erzeugung berechneten Quell- und Zielverkehrsaufkommen zu Verkehrsströmen „von *i* nach *j* mit Verkehrsmittel *k*“ zu gelangen, ist eine Bewertung der Wege nach Verkehrsmitteln notwendig. Diese Bewertung bzw. Berechnung des Nutzens für alle Quelle-Ziel-Beziehungen und Verkehrsmittel erfolgt anhand der im vorherigen Schritt ermittelten Modellparameter und der abgeleiteten Angebots-, Soziodemographie- und Attraktionsvariablen. Die Erstellung der Verkehrsströme erfolgt unter Beachtung von Randsummen- und Gleichgewichtsbedingungen.

$$V_{ijk} = \text{Konstante} + \sum_i \beta_{\text{Verkehrsangebot } i} X_{\text{Verkehrangebot } i} + \sum_j \beta_{\text{Attraktion } j} X_{\text{Attraktion } j} + \sum_k \beta_{\text{Soziodem } k} X_{\text{Soziodem } k}$$

Damit werden in EVA neben den Strukturdaten für das Erzeugungsmodell auch die Angebots-, Soziodemographie- und Attraktionsvariablen sowie die geschätzten Modellparameter für das simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodell importiert. Die Angebotsvariablen werden aus den zuvor erstellten Verkehrsnetzen abgeleitet. Die berücksichtigten Angebots-, soziodemographischen- und Attraktionsvariablen nach Verkehrsart sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Komponenten der Nutzenfunktionen

	MIV	ÖV	Velo	zu Fuss
Verkehrs- angebot	Reisezeit	Reisezeit	Reisezeit	Reisezeit
	Reisekosten	Reisekosten	Höhe	Höhe
		Zugangszeit		
		Abgangszeit		
		Umsteigezahl		
		Bedienungshäufigkeit		
Soziode- mographie	PW-Besitz	Jahresabonnement	Alter	Alter
		Halbtaxabonnement		
		Alter		
Attraktion	Verkaufsfläche	Verkaufsfläche	Verkaufsfläche	Verkaufsfläche
	Freizeitangebot	Freizeitangebot	Freizeitangebot	Freizeitangebot
	Parkkosten			
	Parksuchzeit			

Für das ÖV-Modell wurde eine fahrplanfeine Umlegung und für den MIV eine Gleichgewichtsumlegung verwendet. Die Fuss- und Veloreisezeiten werden aus dem MIV-Netz, anhand von mittleren Reiseschwindigkeiten (4 km/h für Fuss- und 12 km/h für Velowege; aus MZMV 2015 ermittelt) ermittelt. Die Reisekosten im ÖV werden mit 0.20 CHF/km und im MIV mit 0.16 CHF/km berechnet (aus NPVM und anderen kantonalen GVM übernommen). Alle weiteren Variablen wurden direkt aus VISUM abgeleitet. Die Bedienungshäufigkeit im ÖV wird als mittlere Fahrzeugfolgezeit einer Quelle-Ziel-Beziehung definiert. Diese Variable wird aus der (über dem Reisezeitäquivalent) gewichteten Anzahl Verbindungen in der betrachteten Umlegungsperiode berechnet.

Für die Erstellung der ÖV-Angebotskenngrößen werden die gleichen Parametereinstellungen verwendet wie bei der Umlegung. Die verwendeten Einstellungen sind in Abbildung 11 dargestellt. Des Weiteren wird für die Berechnung der MIV-Reisezeit, im Gegensatz zur Umlegung, bei den Anbindungen eine konstante CR-Funktion angenommen. Für die Nachfrageberechnungen wird die MIV-Reisezeit aus drei Modellzuständen ermittelt:

$$\begin{aligned}
 & 0.6 \times \text{Reisezeit im DWV-Modell} \\
 + & 0.2 \times \text{Reisezeit im ASP-Modell} \\
 + & \underline{0.2 \times \text{Reisezeit im MSP-Modell}} \\
 = & \text{Reisezeit Nachfragemodell}
 \end{aligned}$$

Abbildung 11: Vorauswahl u. Parameter für die Widerstandsfunktion bei der Kenngrössenberechnung

Vorauswahl

Verbindungen mit ÖV und ohne ÖV auf einer Beziehung: i

Keine Verbindung löschen v

Verbindungen löschen, die vollständig im Vor- oder Nachlauf liegen

Verbindungen löschen, die vor Beginn des Umlegungszeitraums abfahren
Gilt für abfahrtszeitbezogene Nachfragesegmente

Verbindungen löschen, die nach Ende des Umlegungszeitraums ankommen
Gilt für ankunftszeitbezogene Nachfragesegmente

1. Suchwiderstand

Eine Verbindung wird gelöscht, wenn die folgende Bedingung zutrifft:

Suchwiderstand > * minimaler Suchwiderstand +

Der Suchwiderstand wird entsprechend den Suchparametern berechnet.

2. Reisezeit und Umsteigehäufigkeit

Eine Verbindung wird gelöscht, wenn eine der folgenden Bedingungen zutrifft: i

Reisezeit > * minimale Reisezeit + und Umsteigehäufigkeit nicht minimal

Umsteigehäufigkeit > minimale Umsteigehäufigkeit + und Reisezeit nicht minimal

3. Empfundene Reisezeit (ERZ)

Empfundene Reisezeit (ERZ) > * mittlere ERZ + i

Widerstand

Empfundene Reisezeit (ERZ) =

zahl:	Koeffizient	Attribut		BoxCox	Lambda
	1.00	Fahrzeit im Fzg	* 1.0	<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.00	ÖV-Zusatz-Fahrzeit	* 1.0	<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.01	Zugangszeit		<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.01	Abgangszeit		<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.01	Gehzeit		<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.33	Startwartezeit	Parameter	<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.33	Umsteigewartezeit	Parameter	<input type="checkbox"/>	1.00
+	9min 11s	Umsteigehäufigkeit	* Formel	<input type="checkbox"/>	1.00
+	0min	Anzahl Betreiberwechsel	Parameter	<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.00	Erweiterter Widerstand	Parameter	<input type="checkbox"/>	1.00

Verbindungen mit DeltaT > 0 berücksichtigen, wenn es Verb. mit DeltaT = 0 gibt (empfohlen)
DeltaT = Zeitabstand von gewünschter und tatsächlicher Abfahrts- bzw. Ankunftszeit

Widerstand =

zahl:	Koeffizient	Attribut	BoxCox	Lambda
	1.00	ERZ [min]	<input type="checkbox"/>	1.00
+	0.00	Fahrpreis	<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.00	DeltaT(früh) [min]	<input type="checkbox"/>	1.00
+	1.00	DeltaT(spät) [min]	<input type="checkbox"/>	1.00

Zeitabhängige Widerstandsberechnung

Ganglinienintervalle feiner aufrastern

Maximale Intervalllänge:

Um eine plausible Matrixstruktur im interzonalen Verkehr ermitteln zu können, ist es wichtig, dass auch der Anteil des intrazonalen Verkehrs soweit wie möglich plausibel geschätzt wird. Der Anteil des intrazonalen Verkehrs wird vor allem durch die Angebotsvariablen auf den Diagonalen, d.h. den mittleren Widerstand für einen Weg innerhalb einer Zone, beeinflusst. Da es in VISUM nicht möglich ist, eine plausible Besetzung der Hauptdiagonalen der Aufwandsmatrizen zu generieren, wurden die Hauptdiagonalen für Fuss, Velo, ÖV und MIV extern über das Zeilen-/Spaltenminimum bestimmt. Dazu wurde zunächst für jedes Element der Hauptdiagonalen das Minimum der Elemente aus den zugehörigen Zeilen und Spalten der Aufwandsmatrizen gebildet. Zusätzlich wurde dieses Minimum mit einem Faktor von 0.8 multipliziert und in die Aufwandsmatrix übernommen.

$$A_{ii} = 0.8 * \min(A_{ij}; A_{ji})$$

Dies bewirkt, dass alle Aufwände des Binnenverkehrs 20 % geringer sind als die kleinsten Aufwände zu einem benachbarten Verkehrsbezirk.

Die Berechnung der Verkehrsströme wird für alle 27 Quelle-Ziel-Gruppen und die vier Verkehrsmittel durchgeführt. Damit werden insgesamt 108 Verkehrsstrommatrizen erstellt. Da zwischen einzelnen Quelle-Ziel-Gruppen Abhängigkeiten vorhanden sind, werden die jeweiligen Verkehrsströme teilweise mit harten oder weichen/elastischen Randsummenbedingung berechnet (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Randsummenbedingungen bei der Berechnung der Quelle-Ziel-Ströme

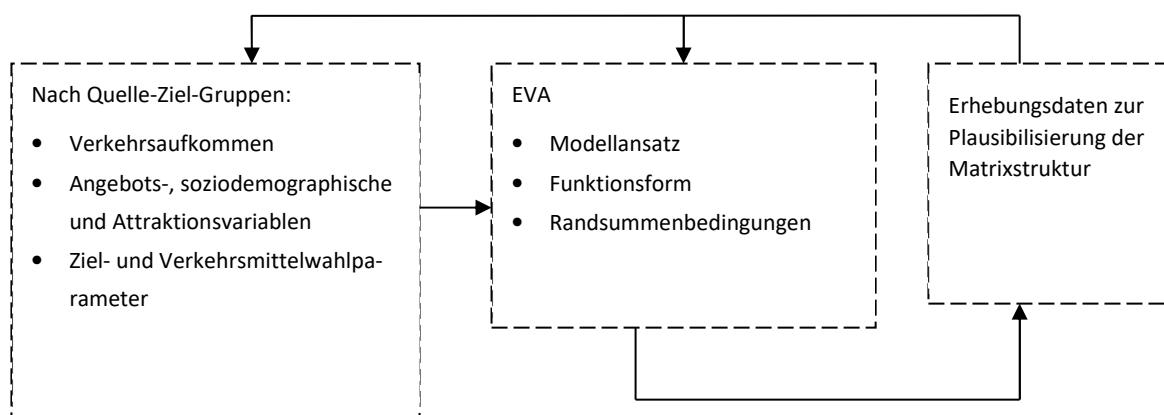
QZG	Quelle-Ziel-Gruppe	Quellverkehr	Zielverkehr
WA	Wohnen – Arbeit	hart	hart
WBS	Wohnen – Ausbildung Schule	hart	hart
WBU	Wohnen – Ausbildung Universität	hart	hart
WEk	Wohnen – Einkauf kurzfristig	hart	elastisch
WEI	Wohnen – Einkauf langfristig	hart	elastisch
WN	Wohnen – Nutzfahrt	hart	hart
WBg	Wohnen – Begleitung	hart	elastisch
WFk	Wohnen – Freizeit kurz	hart	elastisch
WFI	Wohnen – Freizeit lang	hart	elastisch
AW	Arbeit – Wohnen	hart	hart
BSW	Ausbildung Schule – Wohnen	hart	hart
BUW	Ausbildung Universität – Wohnen	hart	hart
EKW	Einkauf kurzfristig – Wohnen	elastisch	hart
EIW	Einkauf langfristig – Wohnen	elastisch	hart
NW	Nutzfahrt – Wohnen	hart	hart
BgW	Begleitung – Wohnen	elastisch	hart
FkW	Freizeit kurz – Wohnen	elastisch	hart
FIW	Freizeit lang – Wohnen	elastisch	hart
AS	Arbeit – Sonstiges	elastisch	elastisch
SA	Sonstiges – Arbeit	elastisch	elastisch

BS	Bildung – Sonstiges	elastisch	elastisch
SB	Sonstiges – Bildung	elastisch	elastisch
ES	Einkauf – Sonstiges	elastisch	elastisch
SE	Sonstiges – Einkauf	elastisch	elastisch
NS	Nutzfahrt – Sonstiges	elastisch	elastisch
SN	Sonstiges – Nutzfahrt	elastisch	elastisch
SS	Sonstiges – Sonstiges	elastisch	elastisch

Vor der Erstellung der endgültigen Matrizen war es notwendig, verschiedene Testläufe durchzuführen. Diese sollen prüfen, wie plausibel die Eingangsdaten sind und welcher Ansatz bei der Eichung des Modells die besten Ergebnisse liefert.

Die Erstellung der Quelle-Ziel-Ströme wird durch eine Rückkoppelung zwischen der Matrixerstellung und der Plausibilisierung der Matrixstruktur optimiert. Wie im folgenden Kapitel beschrieben, wird aus einem Vergleich der ermittelten Matrixstruktur mit den vorhandenen Erhebungsdaten eine Plausibilisierung der verwendeten Eingangsdaten durchgeführt. Es werden darüber hinaus die Modellstruktur, die Funktionsformen der Ziel- und Verkehrsmittelwahl und die Modellparameter sowie eventuelle Fehler bei den Angebotsvariablen überprüft. Zusätzlich werden in den ersten Iterationsschritten die Auswirkungen der intrazonalen Angebotsvariablen (Angebotscharakteristiken für die Wege innerhalb einer Zone) überprüft. Damit erfolgen die Erstellung und Eichung der Matrixstruktur in einem iterativen Prozess. Das Vorgehen ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Kalibration der Matrizen auf die Querschnittszählungen erfolgt erst nach der Umlegung, wenn die Matrixstruktur plausibel und geeicht ist.

Abbildung 12: Vorgehen zur Erstellung und Eichung der Matrixstruktur



Im Rahmen der Eichung der Matrixstruktur werden sowohl die Modellstruktur (harte und elastische Randsummenbedingungen, Lösungsverfahren) als auch Modellfunktionen und einzelne Modellparameter optimiert. Bei bestimmten Quelle-Ziel-Gruppen wird dafür eine sog. Box-Tukey-Transformation verwendet, um eine nichtlineare Modellfunktion – und damit eine bessere Anpassung an die Realität – zu erreichen. Diese lässt sich durch die Einführung von zusätzlichen Modellparametern in EVA sehr flexibel einbauen. Die Transformation wird bei den Zeit- und Kostenparametern verwendet, da diese Variablen für die Verteilung und Aufteilung von zentraler Bedeutung sind. Durch die Modelloptimie-

rung ist es möglich, sowohl die Verkehrsmittelwahlanteile als auch die Reiseweiteverteilung der Matrizen auf die Erhebungsdaten zu eichen. Bei der Eichung der Matrixstruktur werden nur die Binnenströme, d.h. die Ströme mit Quelle und Ziel innerhalb des Modellgebietes, berücksichtigt.

Da für die Ströme mit Quelle oder Ziel ausserhalb des Modells, die so genannten Aussenströme, kein genauer Verkehrswiderstand aus dem Modell ermittelt werden kann, werden diese aus dem NPVM übernommen. Zu diesem Zweck wurde eine Zuordnung der Zonen des NPVM zu den Zonen des GVM LU erstellt. Bei der Aufteilung des Verkehrsaufkommens wurden Arbeitsplätze und Einwohner als massgebende Variablen verwendet.

8.1.4 Validierung der Matrixstruktur (Binnenmatrix)

Die Validierung der Binnenverkehrsmatrix wird anhand des MZMV 2015 durchgeführt. Die Überprüfung und Eichung der Aufteilung zwischen inter- und intrazonalen Fahrten, der Modal-Split-Anteile und der Reiseweiteverteilung ist im Folgenden beschrieben.

Tabelle 13 zeigt die Eckwerte der berechneten inter- und intrazonalen Matrizen im Binnenverkehr für alle vier Verkehrsmittel und nach Fahrtzwecken geordnet.

Tabelle 13: Eckwerte der erstellten Quelle-Ziel-Matrizen [Mio. Wege pro Werktag]

Alle Wege	MIV	ÖV	Velo	Fuss	Summe
Arbeit	0.40	0.07	0.07	0.10	0.64
Ausbildung	0.03	0.04	0.04	0.12	0.22
Einkauf	0.30	0.05	0.03	0.15	0.54
Nutzfahrt	0.14	0.00	0.01	0.03	0.18
Freizeit	0.28	0.07	0.06	0.13	0.54
Summe	1.15	0.24	0.20	0.52	2.11
Interzonale Wege	MIV	ÖV	Velo	Fuss	Summe
Arbeit	0.38	0.07	0.06	0.06	0.57
Ausbildung	0.02	0.04	0.02	0.07	0.14
Einkauf	0.24	0.05	0.03	0.09	0.41
Nutzfahrt	0.13	0.00	0.01	0.02	0.16
Freizeit	0.26	0.06	0.05	0.08	0.45
Summe	1.04	0.22	0.16	0.31	1.73
Anteil interzonale Wege [%]					
WISEVA	90.4	93.5	79.3	59.4	82.0
MZMV 2015	91.3	98.5	82.1	57.3	82.2

Von den ca. 1.73 Mio. interzonalen Wegen werden ca. 60 % mit dem MIV, 13 % mit dem ÖV, 9 % mit dem Velo und 18 % zu Fuss zurückgelegt. Wird der Modal Split nach Fahrtzwecken betrachtet, ist der ÖV-Anteil bei Ausbildungswegen (26 %) höher, bei den Arbeits-, Einkaufs- und Freizeitwegen (12-14 %) gleich hoch und bei den Nutzfahrtwegen (3 %) tiefer als im Gesamtdurchschnitt. Die Modal-Split-Anteile nach Fahrtzwecken und Wegen sowie der Vergleich mit dem MZMV 2015 sind Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Modal-Split-Anteile der erstellten Quelle-Ziel-Matrizen im Vergleich mit dem MZMV 2015, interzonale Wege [%]

	MIV		ÖV		Velo		Fuss	
	EVA	MZMV	EVA	MZMV	EVA	MZMV	EVA	MZMV
Arbeit	66.7	65.8	12.4	12.9	10.9	10.3	10.0	10.9
Ausbildung	14.4	16.2	25.5	22.6	12.6	16.8	47.5	44.5
Einkauf	59.4	59.7	11.9	9.5	6.9	7.7	21.9	23.0
Nutzfahrt	82.8	81.4	2.7	3.0	4.3	4.9	10.2	10.6
Freizeit	58.2	58.8	14.2	14.9	10.1	10.2	17.6	16.1
Alle Fahrtzwecke	59.8	59.2	13.0	12.6	9.3	9.8	17.9	18.4

Die ermittelten Personenkilometer (Pkm) und die mittleren Reiseweiten nach Fahrtzweck und Verkehrsmittel werden in den folgenden zwei Tabellen präsentiert. Es ist zu sehen, dass der grösste Teil der Verkehrsleistung im MIV und ÖV für die betrachtete Zonierung im interzonalen Verkehr stattfindet (Tabelle 15).

Tabelle 15: Verkehrsleistung der erstellten Quelle-Ziel-Matrizen nach Fahrtzweck und Verkehrsmittel [Mio Pkm]

Alle Wege	MIV	ÖV	Velo	Fuss	Summe
Arbeit	4.25	0.98	0.22	0.08	5.54
Ausbildung	0.25	0.56	0.08	0.11	1.00
Einkauf	2.22	0.45	0.06	0.13	2.86
Nutzfahrt	1.22	0.05	0.02	0.03	1.31
Freizeit	2.79	0.80	0.17	0.16	3.92
Total	10.73	2.83	0.56	0.51	14.62
Interzonale Wege	MIV	ÖV	Velo	Fuss	Summe
Arbeit	4.18	0.95	0.21	0.06	5.40
Ausbildung	0.22	0.53	0.04	0.07	0.86
Einkauf	2.11	0.45	0.05	0.09	2.70
Nutzfahrt	1.19	0.05	0.02	0.02	1.27
Freizeit	2.71	0.77	0.15	0.11	3.74
Total	10.41	2.74	0.48	0.35	13.98

Durch die sehr kleinen Zonen und damit auch die niedrigen Anteile an intrazonalem Verkehr sind die Unterschiede zwischen den mittleren Reiseweiten aller Wege und denen der interzonalen Wege sehr klein. Es ist zu beachten, dass wegen der fehlenden empirischen Datengrundlage eine genauere Eichung des intrazonalen Verkehrs nicht möglich ist. Eine Korrektur der hier berechneten Anteile im MIV und ÖV ist aber im Rahmen der Kalibration auf die Querschnittszählungen möglich, auch wenn aufgrund der kleinen Zonen und des niedrigen Anteils an intrazonalem Verkehr nicht erforderlich.

Aus der Analyse der Reiseweiten der einzelnen Fahrtzwecke lassen sich teilweise die Gesetzmässigkeiten des Zielwahlverhaltens erkennen. Wie erwartet werden vor allem im Einkaufsverkehr kürzere Wege durchgeführt. Diese Wege haben einen höheren Anteil an den LV-Wege sowie am intrazonalen

Verkehr. Dies wird unter anderem durch die räumliche Verteilung der Attraktionsgrössen (Einkaufszentren bzw. Einkaufsstrassen) beeinflusst.

Tabelle 16: Mittlere Weglängen der erstellten Quelle-Ziel-Matrizen im Vergleich mit dem MZMV 2015

[km]	MIV		ÖV		Velo		Fuss	
	EVA	MZMV	EVA	MZMV	EVA	MZMV	EVA	MZMV
Arbeit	11.09	10.52	13.56	14.70	3.43	3.50	0.95	0.93
Ausbildung	10.57	9.80	14.37	12.94	2.34	2.19	1.03	1.02
Einkauf	8.65	6.72	9.19	8.50	1.88	1.84	1.03	0.97
Nutzfahrt	9.26	8.96	11.52	12.06	2.63	2.88	1.09	0.85
Freizeit	10.24	9.30	11.93	12.91	3.39	4.06	1.37	1.40
Total	10.06	9.05	12.23	12.44	2.99	3.07	1.11	1.06

Für die Beurteilung der ermittelten Quelle-Ziel-Matrizen ist die Reiseweitenverteilung ein weiterer wichtiger Indikator. Sie gibt einen ersten Überblick über die räumliche Verteilung und Struktur der Verkehrsstrommatrix, die für die Qualität eines Verkehrsmodells entscheidend ist. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle ein Vergleich der Reiseweitenverteilung der interzonalen Verkehrsströme mit der Reiseweitenverteilung dieser Ströme im MZMV 2015 durchgeführt. Der Vergleich ist für alle Wege sowie getrennt für die fünf betrachteten Fahrtzwecke in den folgenden Abbildungen (Abbildung 13 bis Abbildung 18) dargestellt. Hier werden jeweils die kumulierten Verteilungen dargestellt. Es ist festzustellen, dass die hier ermittelten Verkehrsstrommatrizen bezüglich ihrer Reiseweitenverteilung die Struktur der Fahrten im MZMV 2015 gut reproduzieren. Bei einzelnen Distanzklassen und Fahrtzwecken wurde auf eine genauere Übereinstimmung mit dem Kurvenverlauf aus dem MZMV 2015 zugunsten einer besseren Konsistenz mit den vorliegenden Zählenden verzichtet.

Abbildung 13: Weglängenverteilung Modell vs. MZMV 2015: alle Fahrtzwecke

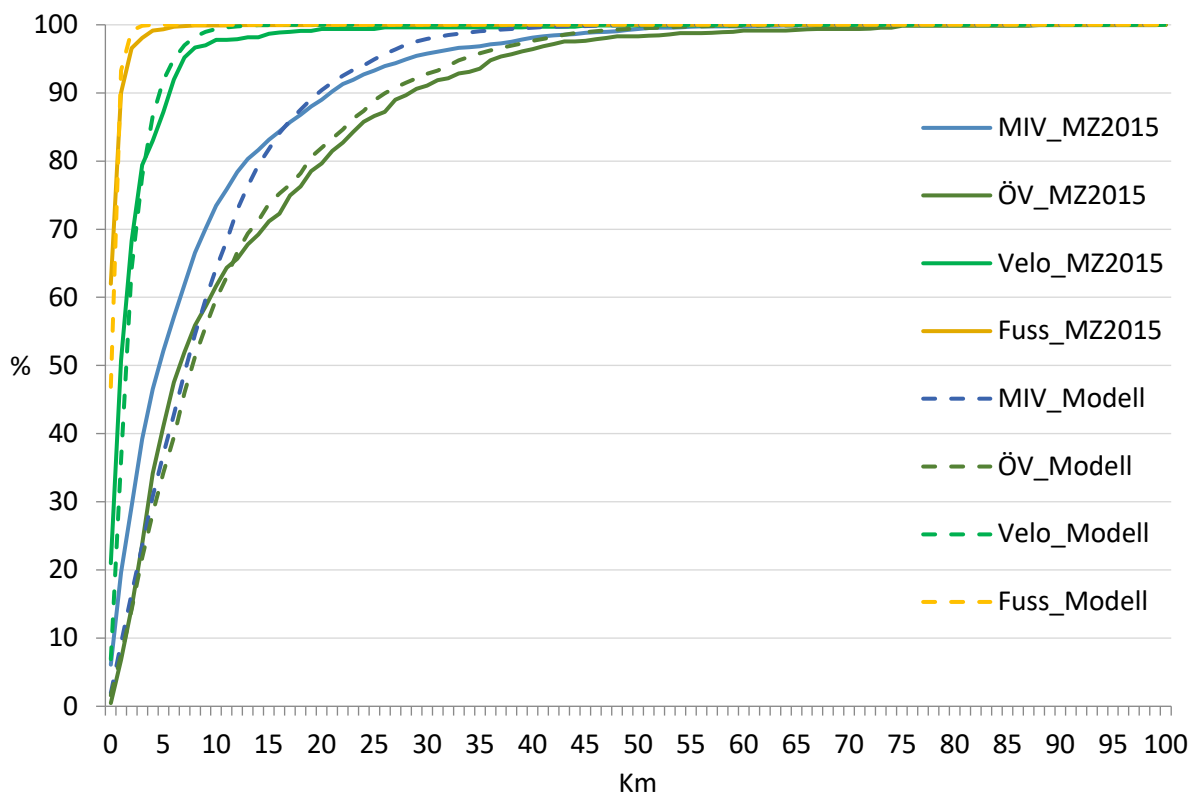


Abbildung 14: Weglängenverteilung Modell vs. MZMV 2015: Fahrtzweck Arbeit

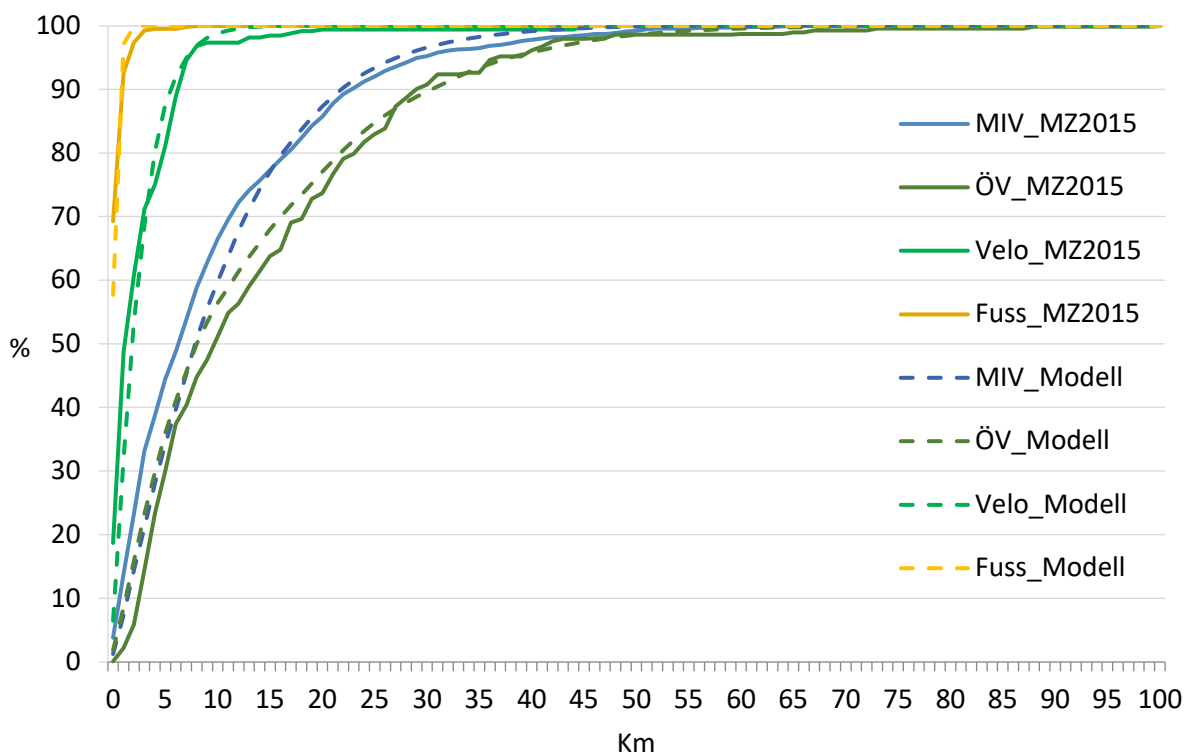


Abbildung 15: Weglängenverteilung Modell vs. MZMV 2015: Fahrtzweck Ausbildung

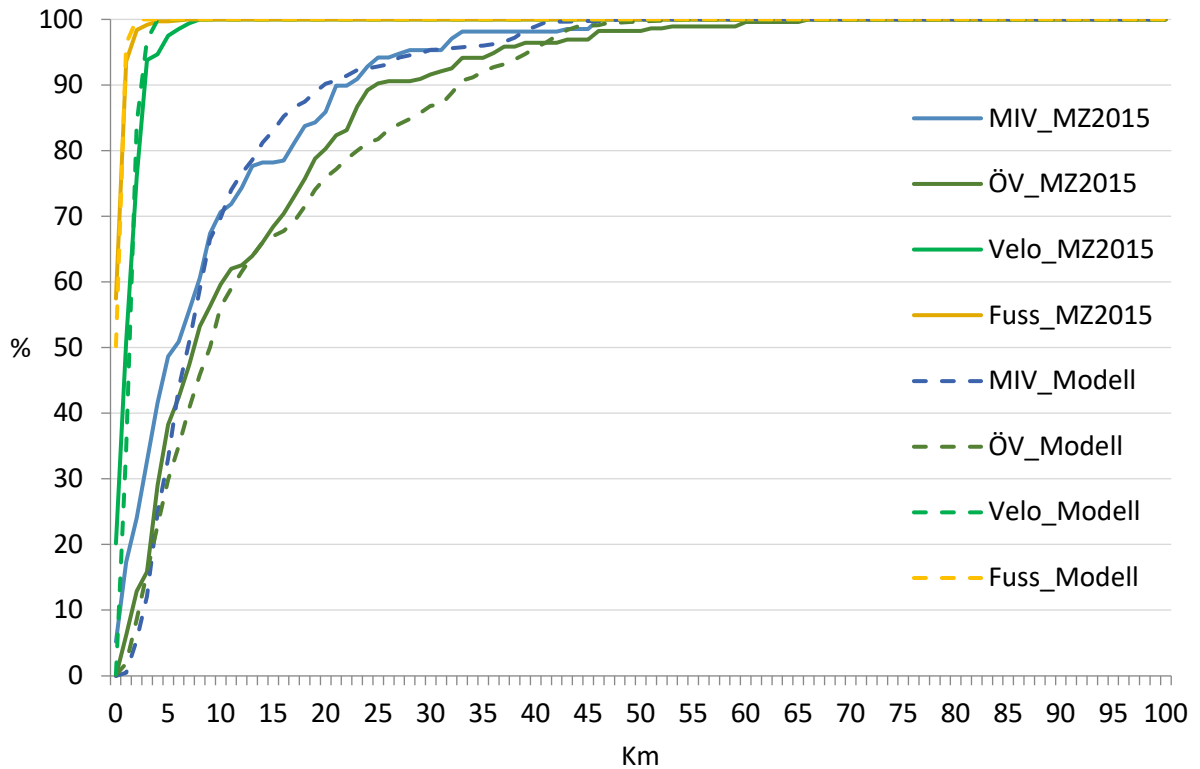


Abbildung 16: Weglängenverteilung Modell vs. MZMV 2015: Fahrtzweck Einkauf

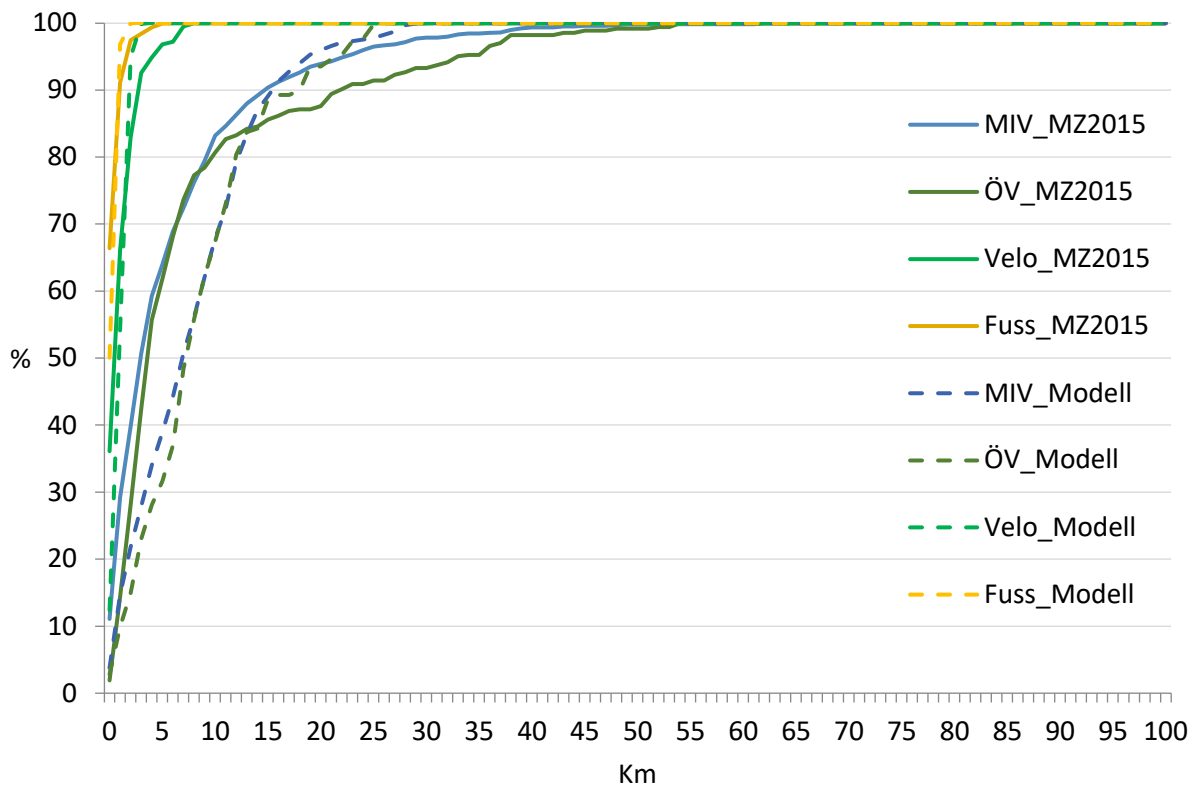


Abbildung 17: Weglängenverteilung Modell vs. MZMV 2015: Fahrtzweck Nutzfahrt

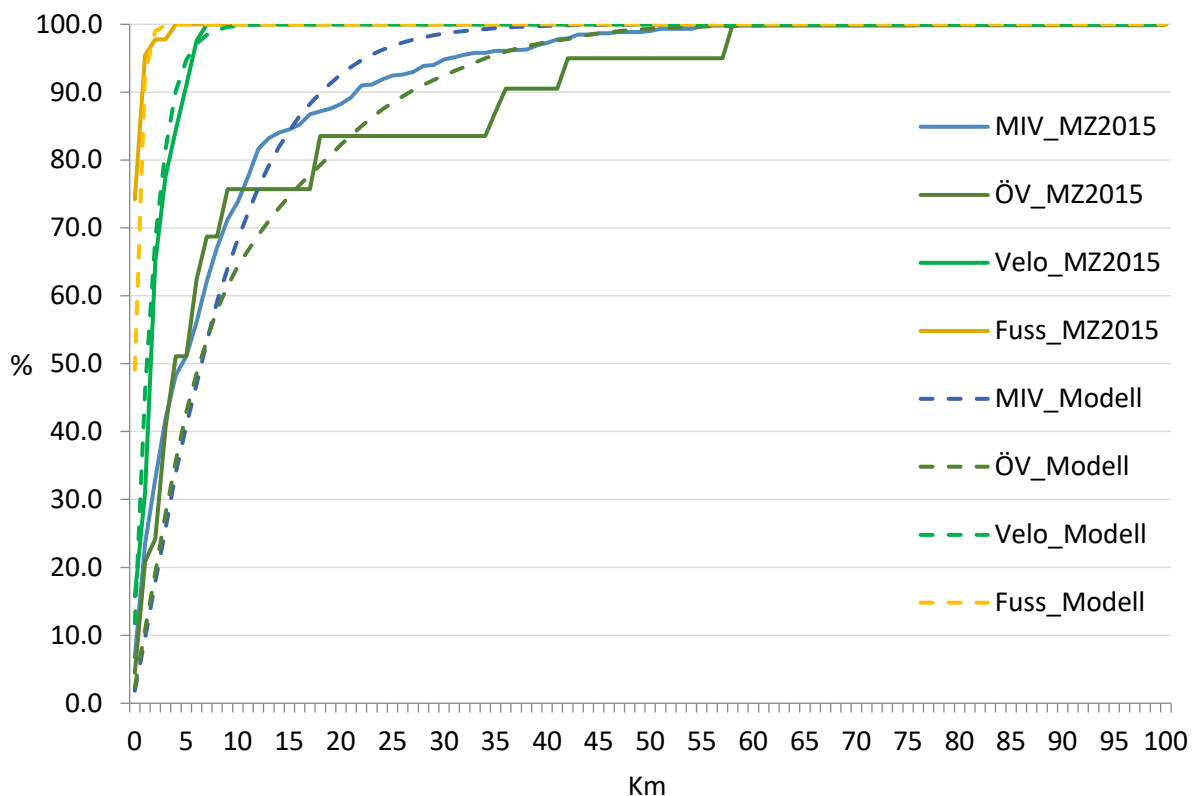
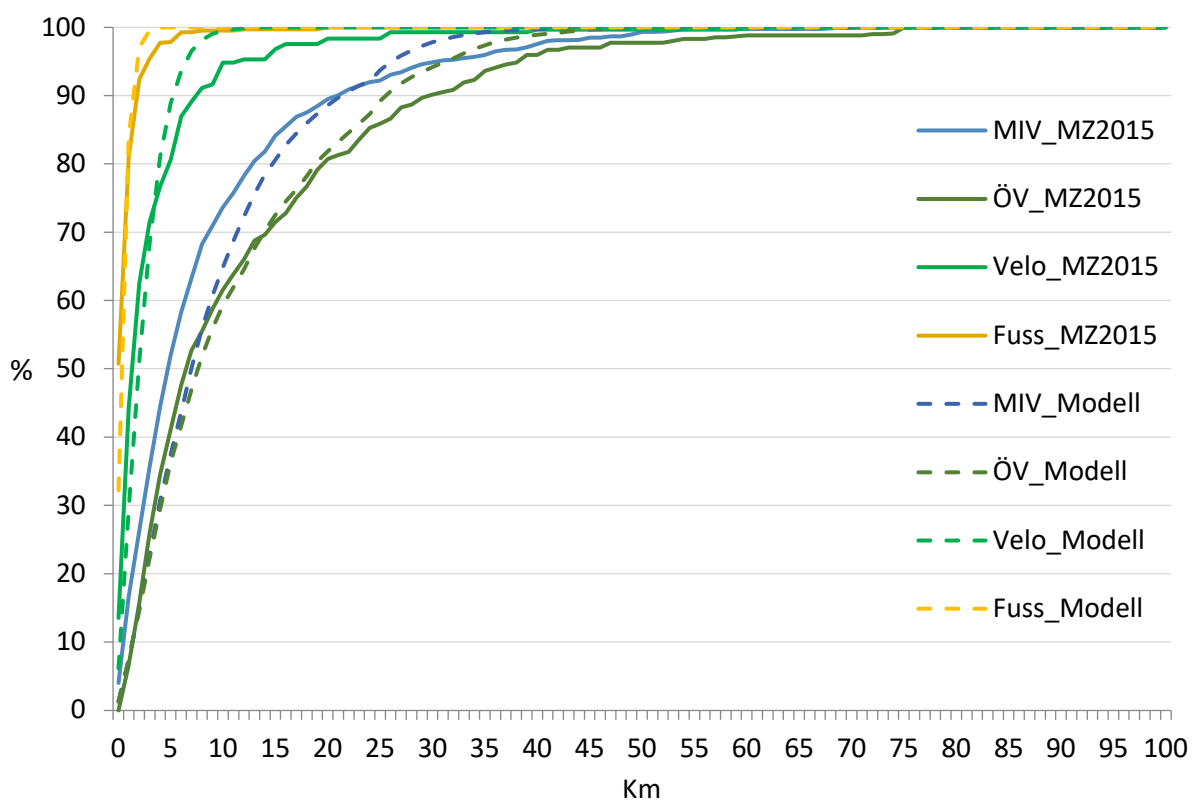


Abbildung 18: Weglängenverteilung Modell vs. MZMV 2015: Fahrtzweck Freizeit



8.1.5 Umlegung und Validierung der Netzbelastungen

Umlegungsverfahren

Die erstellten Nachfragematrizen werden im nächsten Schritt auf das Verkehrsangebot umgelegt und anhand von Querschnittszählungen überprüft.

Im MIV-Modell wird als Umlegungsmethode ein deterministisches Nutzergleichgewicht verwendet. Bei der Auswahl der Umlegungsmethode im MIV wurde auch das stochastische Umlegungsverfahren getestet. Da die Umlegungen mit diesem Verfahren in VISUM eine sehr lange Rechenzeit benötigen, wird auf dessen Anwendung verzichtet, auch wenn es für die städtischen MIV-Netze ein besser geeignetes Umlegungsverfahren darstellt. Das deterministische Nutzergleichgewicht wird im MIV für das Nachfragesegment Personenwagen (PW) und die Sukzessivumlegung für den Strassengüterverkehr (LI, LW und LZ) verwendet.

Im ÖV-Modell wird als Umlegungsmethode ein fahrplanfeines Verfahren verwendet. Die Parameter und die Bewertung der einzelnen Routenwahlkomponenten werden aus dem geschätzten Entscheidungsmodell (SP-Befragung 2015) übernommen. Die Nachfrageaufteilung auf die Route bzw. Verbindung im ÖV wird mit dem sogenannten Logit-Ansatz berechnet. Aus den Analysen der Umlegungsergebnisse, der Verteilung der Verkehrsströme auf die Verbindungen und den Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen, wurde hier der β -Parameter auf $\beta=0.092$ kalibriert.

Zusätzlich zu den in Abbildung 11 dargestellten Angebotsparametern wurde in der Widerstandsfunktion auch ein Komfortfaktor berücksichtigt. Dafür wurden zu den aus den SP-Befragungen 2004 (siehe Bericht OeVM-AFV, Vrtic *et al.*, 2005) ermittelten Komfortparametern ein zusätzlicher Malusfaktor von 0.25-mal Fahrzeit für das Verkehrsmittel Bus eingeführt.

Strassengüterverkehrsmatrizen

Der Schwerverkehr wird als separate Matrizen zugespielt und nicht als fixe Vorbelastung auf dem Strassennetz betrachtet. Da bei fixen Vorbelastungen die Wirkung einer strassenseitigen Massnahme auf das Routenwahlverhalten beim Strassengüterverkehr nicht modelliert werden kann, wurden die LI-, LW- sowie LZ-Matrizen aus dem Nationalen Güterverkehrsmodell verwendet. Die Lieferwagen wurden proportional zu Einwohnern und Arbeitsplätzen und die Lastwagen sowie die Last- und Sattelzüge proportional zu Arbeitsplätzen aus dem Nationalen Güterverkehrsmodell auf die GVM-Zonen disaggregiert. Im letzten Schritt wurden diese Matrizen umgelegt (deterministisches Gleichgewicht) und auf die Zähldaten kalibriert. Die verwendeten Zähldaten werden als Streckenattribute (Strecken/Zählstellen/Summe (benutzerdefiniertes Attribut)) gespeichert. Die Streckenbelastungen werden in PW-Einheiten derart umgerechnet, dass ein Lieferwagen als eine PW-Einheit, ein Lastwagen als zwei und ein Last- oder Sattelzug als 2.5 PW-Einheiten betrachtet werden. Diese werden als Vorbelastung bei der Umlegung der PW-Matrix verwendet. Durch die Umlegung dieser Matrix wird es möglich, den Einfluss des Schwerverkehrs auf die Reisezeit und das Routenwahlverhalten im MIV bei einer Modellanwendung zu berücksichtigen. Es muss aber beachtet werden, dass die Qualität der Strassengüterverkehrsmatrizen und des Routenwahlverhaltens nicht geprüft wurde und die Matrix anhand einer sehr kleinen Anzahl an Zählstellen geeicht wurde. Damit lässt sich die Auswirkung von Massnahmen auf das Güterverkehrsverhalten mit diesen Matrizen nicht ermitteln.

Umlegungsergebnisse

Die Quelle-Ziel-Matrizen für die Umlegung und Ermittlung von Netzbelastungen werden aus je zwei Teilmatrizen erstellt:

- Binnenverkehrsmatrix aus EVA;
- Aussenmatrix (Quell-, Ziel- und Transitmatrix) aus dem Nationalen Verkehrsmodell.

Die aus dem NPVM filtrierte Aussenströme müssen in einem ersten Schritt auf die kantonale Zonierung disaggregiert werden. Dies wird mit Hilfe des in VISUM vorhandenen Teilnetzgenerators und den Aufteilungskriterien Einwohner und Arbeitsplätze der Zonen durchgeführt. Die Aussenströme wurden im Rahmen des Nationalen Verkehrsmodells auf die Querschnittszählungen geeicht und werden hier nicht weiter kalibriert. Damit wird bei der späteren Kalibration auf die Querschnittszählungen nur die Binnenverkehrsmatrix aus EVA berücksichtigt, bzw. verändert werden.

Der Vergleich der Modellbelastungen mit den Zählwerten im MIV ist in Abbildung 19 dargestellt. In dieser Abbildung ist zu sehen, dass die Abweichungen zwischen den Modellbelastungen und den Querschnittszählungen in den meisten Fällen relativ klein sind. Eine etwas geringere Qualität weisen die ÖV-Matrizen auf. Der Vergleich der ermittelten Modellbelastungen mit den verfügbaren Querschnittszählungen ist hier in Abbildung 20 dargestellt. Die grösseren Abweichungen (rot markiert) sind Aussenströme aus dem NPVM und stimmen weniger gut mit den Zählwerten überein. Diese Werte wurden im Rahmen der Kalibration angepasst. Es ist ferner zu beachten, dass in beiden Abbildungen nicht plausible Zählwerte noch nicht ausgeschlossen worden sind. Diese Filtrierung wurde im Verlauf der Modellkalibration durchgeführt. Durch diese Plausibilisierung und die Modellkalibration werden die vorhandenen Differenzen weiter reduziert.

Abbildung 19: Vergleich der Streckenbelastungen Modell vs. Zählung – MIV (ohne Kalibration)

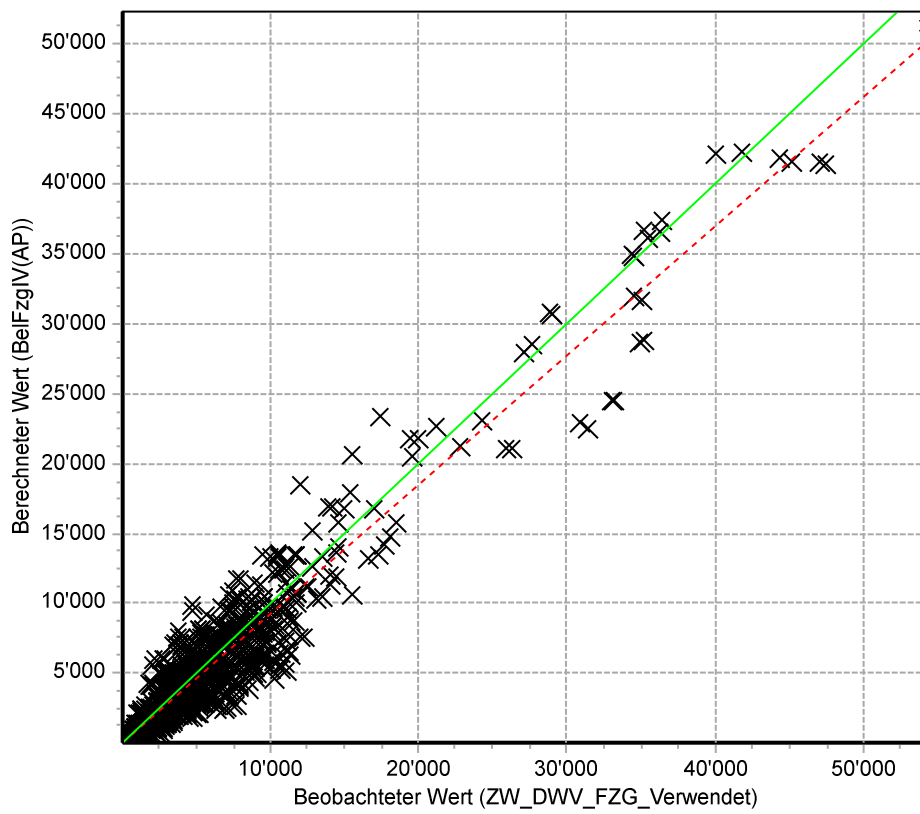
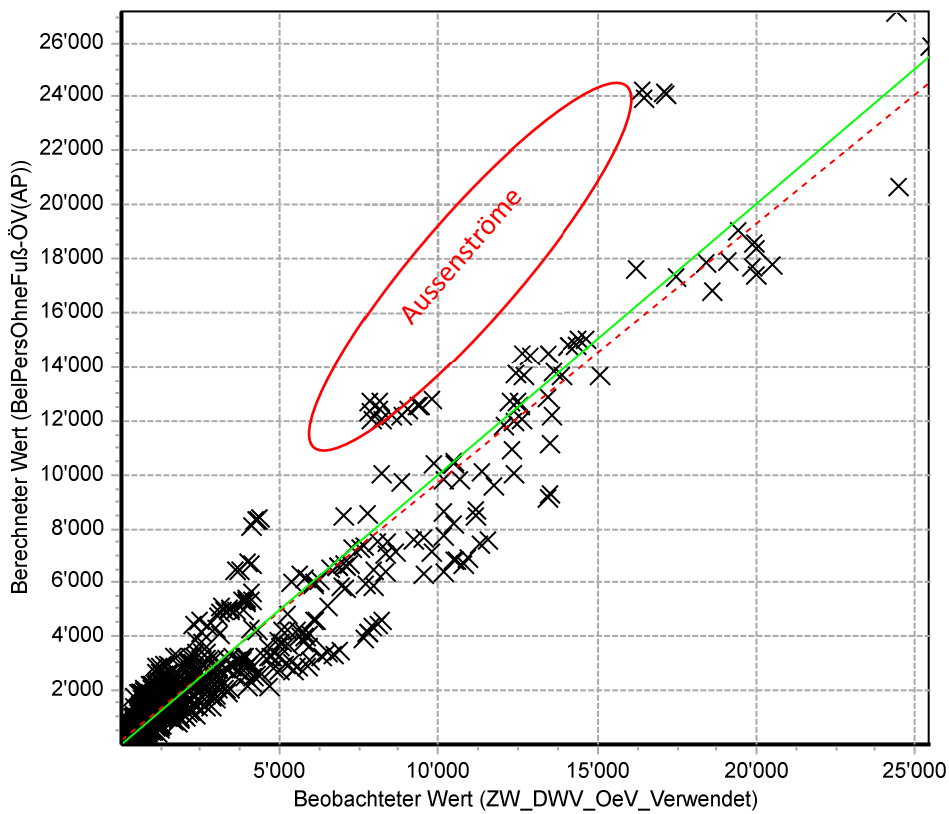


Abbildung 20: Vergleich der Streckenbelastungen Modell vs. Zählung – ÖV (ohne Kalibration)



8.2 Spitzenstundenmodelle

In diesem Kapitel werden die stundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen für die Spitzenstunden beschrieben. Die durchgeführten Arbeiten beziehen sich auf den Personenverkehr des MIV und ÖV. Folgende Arbeitsschritte werden nun skizziert:

- Ableitung der zeitlichen und räumlichen Nachfragevariationen nach aggregierten Quelle-Ziel-Gruppen aus dem Mikrozensus, und
- Berechnung der für die Spitzenstunden relevanten stundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen.

8.2.1 Ableitung der zeitlichen und räumlichen Nachfragevariationen nach QZG

Für die Erstellung der stundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen müssen in einem ersten Schritt die räumlichen und zeitlichen Variationen der Verkehrsnachfrage bestimmt werden. Durch die räumlichen Variationen werden die zusätzlichen Unterschiede in der Verkehrsstärke einer Quelle-Ziel-Beziehung nach Richtungen innerhalb eines Zeitintervalls beschrieben. Da innerhalb eines stündlichen Zeitintervalls die Verkehrsnachfrage einer Relation nach Richtungen sehr unterschiedlich sein kann, müssen diese zwei 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-Gruppen (QZG) die wesentliche Grundlage für die Beschreibung der räumlichen Nachfragevariationen. In den Quelle-Ziel-Gruppen 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 27 QZG aus EVA wurden zuerst zu 10 QZG aggregiert (aggQZG), um Gruppen mit einer kleinen Stichprobe im MZMV 2015 und ähnlichem Verhalten zusammenzufassen.

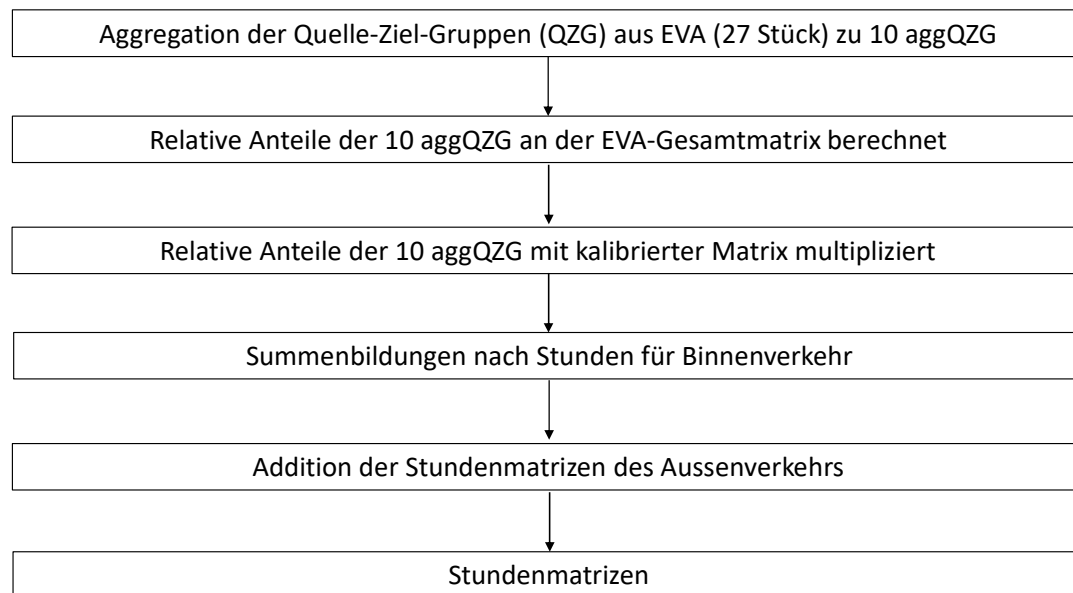
8.2.2 Berechnung von stundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen

Die im vorherigen Kapitel nach aggregierten QZG berechneten Nachfragevariationen während eines Werktages und die Verkehrsstrommatrizen nach QZG sowie die kalibrierten DWV-Matrizen ÖV und MIV stellen die Grundlage für die Generierung der stundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen dar. Dafür werden die nach Verkehrsmitteln kalibrierten Matrizen weiter auf die aggregierten QZG (Anzahl Typen: 10) disaggregiert.

Aus den nach Segmenten disaggregierten Tagesmatrizen und den im vorherigen Arbeitsschritt berechneten Stundenanteilen nach Segmenten werden die Stundenmatrizen erstellt. Diese werden in einem weiteren Schritt zu Stundenmatrix aufsummiert. In der MZVM-Auswertung nach Verkehrsmodi, den 10 aggQZG und den 24 Tagesstunde zeigte sich, dass insbesondere für die anteilmässig kleineren QZGs (Einkaufen oder Nutzfahrt) in den schwach nachgefragten Stunden die Anzahl Fälle zu klein und daher die relativen Anteile teilweise zufällig verteilt sind. Aus diesem Grund wurden die Stundenmatrizen nur für die Spitzenstunden relevanten Stundenscheiben (5-6, 6-7 und 7-8 sowie 15-16, 16-17 und 17-18 Uhr) erstellt.

Die Aussenmatrizen werden aus den Stundenanteilen der Zählquerschnitte an den Modellgrenzen und der kalibrierten DWV-Matrizen 2015 berechnet und stundenfein zu den Binnenmatrizen addiert. In Abbildung 21 ist der Ablauf der Berechnungen der Stundenfeinen Matrizen dargestellt.

Abbildung 21: Vorgehen bei der Berechnung der stundenfeinen Matrizen



8.2.3 Ableitung der Spitzenstunden- aus den Stundenmatrizen (Personenverkehr)

Die Grundlagen für die Erstellung von Spitzenstundenmatrizen stellen die im vorherigen Arbeitsschritt berechneten stundenfeinen Quell-Ziel-Matrizen dar. Da es sich jedoch bei der Abbildung der Spitzenstunden um ein statisches Modell handelt, müssen hier alle Fahrten zwischen 7 und 8 Uhr bzw. 17 und 18 Uhr, die auf den Strassen oder im ÖV stattfinden auch in der Matrix abgebildet werden. Dafür sind alle Fahrten der vorherigen Stunden, die bis 7 bzw. 17 Uhr nicht beendet sind sowie Abfahrten zwischen 7h und 8h bzw. 17h und 18h die länger als eine Stunde dauern, bei der Erstellung der Matrix entsprechend zu berücksichtigen. Für die Zusammensetzung der Fahrten in der betrachteten Spitzenstunde wurde anhand der Reisezeit der betrachteten Quelle-Ziel-Beziehung ein Ansatz aus Vrtic und Fröhlich, 2016 für die Filtrierung der Wege, die in den Spitzenstundenzeiten noch dauern bzw. stattfinden, angewendet. Die Filtrierung der Wege $F_{ij} = P * F_{ij \text{ Zeitscheibenmatrix}}$ erfolgt über die Berechnung der Anteile (P) der einzelnen Quell-Ziel-Beziehung in Abhängigkeit der Reisezeit (t) und der betrachteten Abfahrtszeit:

- Spitzenstundenmatrix (7h-8h und 17h-18h)
 - wenn $t \leq 60 \text{ min}$ $P = 1 - (t / 120)$
 - wenn $t > 60 \text{ min}$ $P = 30 / t$
- Vorherige Stunde (6h-7h und 16h-17h)
 - wenn $t \leq 90 \text{ min}$ $P = t / 120$
 - wenn $t > 90 \text{ min}$ $P = 60 / t$

- Wege innerhalb der Spitzenstundzeit mit einer Abfahrtszeit von zwei und mehreren Stunden vorher (vor 6h und vor 16h)
 - $P = 60 / t$

In den nachfolgenden vier Abbildung sind die Umlegungsanalysen der unkalibrierten Spitzenstundmatrizen der Morgenspitze (MSP, 7-8 Uhr) und Abendspitze (ASP, 17-18 Uhr) für den MIV und den ÖV dargestellt.

Abbildung 22: MIV: Unkalibrierte Morgenspitzenstunde (MSP)

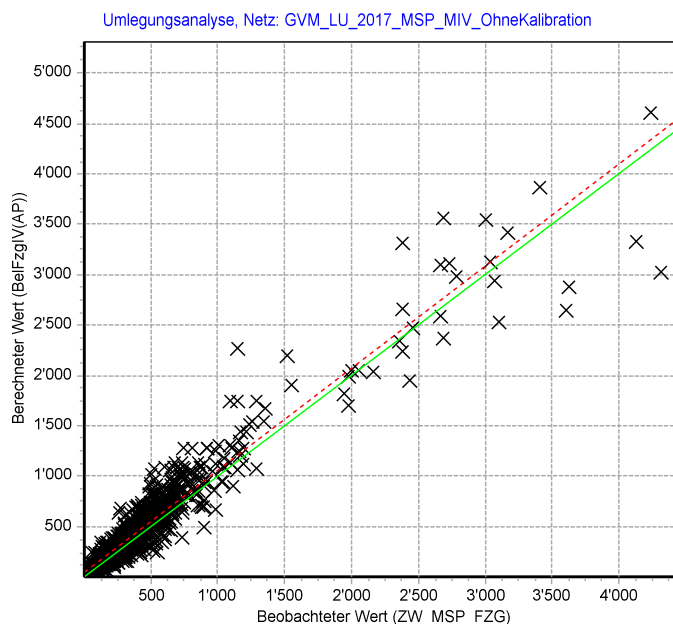


Abbildung 23: MIV: Unkalibrierte Abendspitzenstunde (ASP)

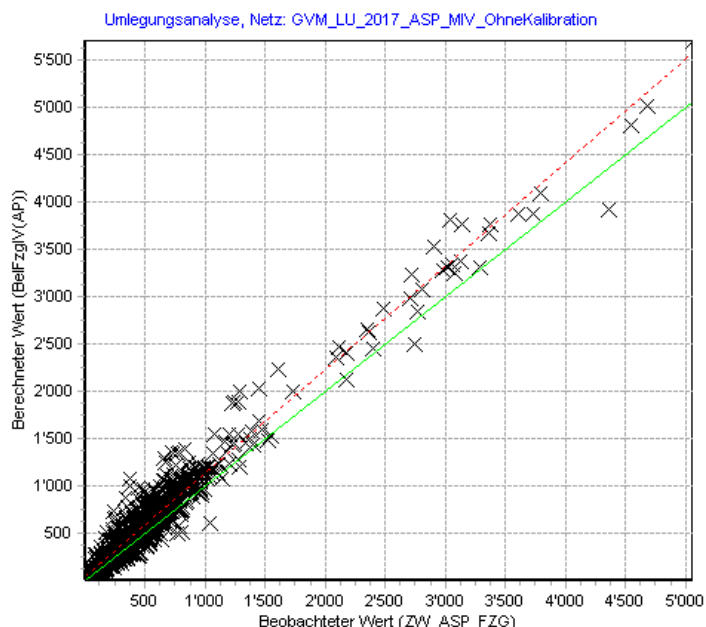


Abbildung 24: ÖV: Unkalibrierte Morgenspitzenstunde (MSP)

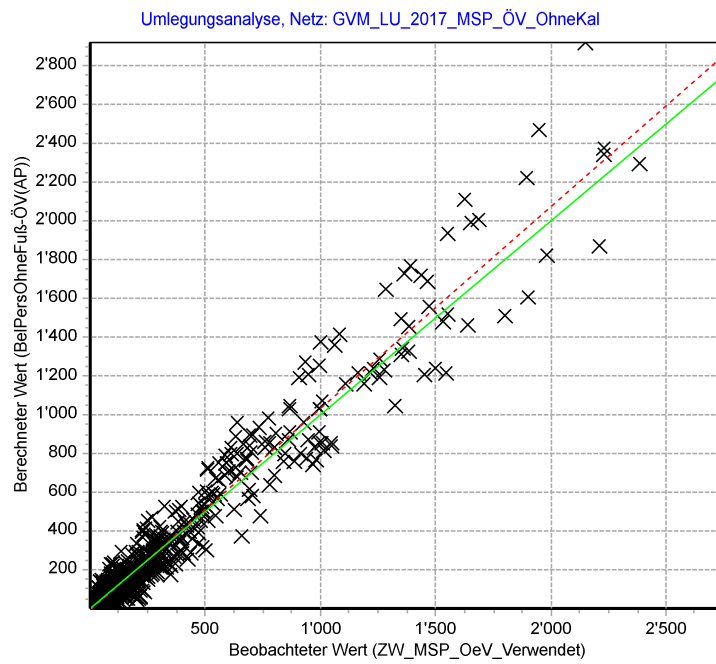
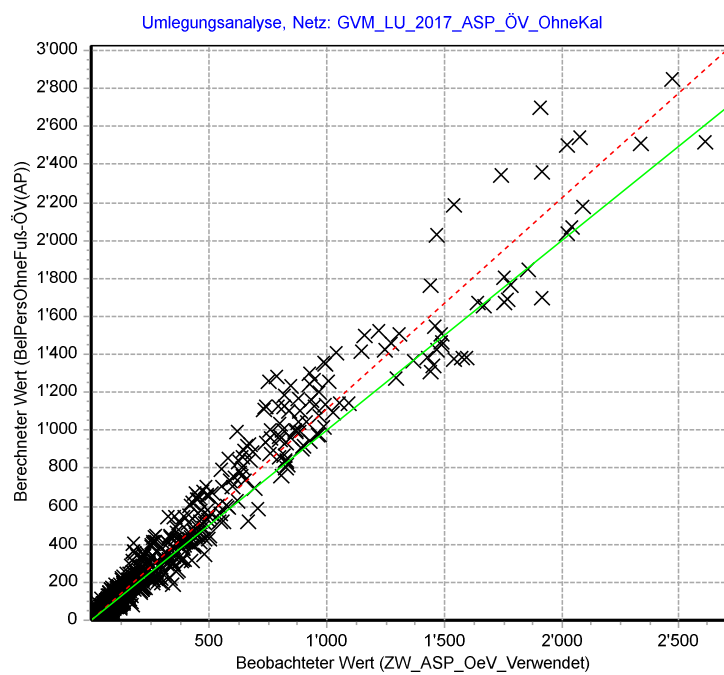


Abbildung 25: ÖV: Unkalibrierte Abendspitzenstunde (ASP)



8.2.4 Ableitung der fahrtzweckspezifischen DWV-Matrizen

Aus den kalibrierten DWV-Matrizen werden fahrtzweckspezifische Matrizen je Verkehrsmittel (MIV, ÖV) berechnet. Diese werden mittels der Fahrtzweckanteile je Quelle-Ziel-Beziehung, welche aus der Nachfrageberechnung resultieren, abgeleitet. Die Fahrtzweckanteile für die Aussenzonen, für welche keine detaillierte Nachfragemodellierung vorliegt, werden aus den NPVM-Querschnitten (NPVM 2010 und 2040) hergeleitet.

8.2.5 Berechnung des DTV aus dem DWV

Die DTV-Matrizen werden folgendermassen aus den DWV-Matrizen abgeleitet. Jede der gemäss dem oben beschriebenen Vorgehen berechneten fahrtzweckspezifischen DWV-Matrizen wird mit einem Faktor (DTV/DWV) multipliziert, welcher aus dem MZMV 2015 abgeleitet wurde. Diese fahrtzweckspezifischen Matrizen werden dann wiederum aufaddiert, um die (noch unkalibrierten) DTV-Matrizen nach Verkehrsmittel zu erhalten. In einem zweiten Schritt werden die Matrizen auf die die DTV-Zähl-daten kalibriert. Die bei diesen Berechnungen verwendeten Faktoren sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Hochrechnungsfaktoren DWV -> DTV

	PW	LI	LW	LZ	ÖV
Arbeit	0.81	-	-	-	0.81
Ausbildung	0.90	-	-	-	0.79
Einkauf	0.99	-	-	-	0.99
Nutzfahrt	0.93	-	-	-	0.92
Freizeit	1.26	-	-	-	1.12
Pauschal	-	0.86	0.78	0.76	-

9 Modellkalibration

9.1 Zähldaten MIV

Die Daten wurden in sehr unterschiedlichen Formaten geliefert, weshalb die Daten jeder Quelle jeweils separat aufbereitet wurden. Für alle Zählstellen gilt, dass die Morgenspitze zwischen 7.00 und 8.00 Uhr und die Abendspitze zwischen 17.00 und 18.00 gemessen wurde. Die Swiss10 Messmethode kennt zehn Fahrzeugkategorien, diese wurden folgendermassen aggregiert:

- Personenwagen (PW) wird gebildet aus Motorrad und PW
- Lieferwagen (LI) wird gebildet aus LI und PW mit Anhänger
- Lastwagen (LW) wird gebildet aus Car/Bus, LI mit Anhänger, LI mit Auflieger und LW
- Lastenzug (LZ) wird gebildet aus LZ und Sattelzug
- Der totale FZG Wert entspricht der Summe der einzelnen Kategorien.

Die Qualitätsstufen wurden aufgrund folgender Kriterien ermittelt (Tabelle 18):

Tabelle 18: Qualitätsstufen nach Dateneigenschaften

Qualitätsstufe	Zählmethode	Dauer	Getrennt nach Richtung	Getrennt nach Fahrzeugklassen
1A	Swiss10 / Swiss7	> 30 Tage	Ja	Ja
1B	Swiss10 / Swiss7	> 30 Tage	Ja	Nein
1C	Swiss10 / Swiss7	> 30 Tage	Nein	Ja
2A	Swiss10 / Swiss7	7 - 30 Tagen	Ja	Ja
2B	Swiss10 / Swiss7	7 - 30 Tagen	Ja	Nein
2C	Swiss10 / Swiss7	7 - 30 Tagen	Nein	Ja
3A	Händisch / NA	>1 Tag	Ja	Ja
3B	Händisch / NA	>1 Tag	Ja	Nein
3C	Händisch / NA	>1 Tag	Nein	Ja
4	Händisch / NA	unabhängig von Dauer	Nein	Nein

Verortet wurden die Zählstellen möglichst automatisiert. Wo nötig, wurde die Verortung aber manuell durchgeführt. Gerade Kreisel, Lichtsignalanlagen oder auch Kreuzungen sind divers aufgebaut und waren deshalb nicht zu automatisieren. Die detaillierten Vorgehensweisen nach Datenquelle sind im Folgenden beschrieben.

ASTRA

Die Rohdaten enthielten stündlich aufgenommene Messwerte für die SWISS10-Kategorien. Metadaten (wie Jahr, Standort usw.) wurden aus einem separaten Dokument extrahiert. Da alle Zählstellen nach SWISS 10, richtungs- und fahrzeugklassengetrennt erfasst wurden und an mindestens 31 Tagen gemessen wurden, wurde bei den ASTRA-Zählern die Qualitätsstufe 1A festgelegt.

Kanton Luzern – (vif)

Pro Richtung waren hier stündliche Totalmesswerte des gesamten Jahres vorhanden. Metadaten wurden aus einem separaten Dokument extrahiert. Sofern keine Trennung in Fahrzeugklassen vorhanden

war, wurde der kantonale Durchschnitt (berechnet aus allen Messungen, welche nach FZG-Klassen getrennt waren) verwendet, um die Anteile je Fahrzeugklasse auszuweisen. Da an allen Zählstellen an über 30 Tagen der Totalverkehr richtungsgetreunt gemessen wurde, wurden bei allen Zählstellen die Qualitätsstufe 3B festgelegt.

Kanton Luzern – LSA-Zählungen

Im Kanton Luzern gab es diverse Spezialfälle, bei denen nicht der Querschnitt, sondern einzelne Spuren gemessen wurden. Um Werte für die Querschnitte zu erhalten, wurden die entsprechenden Spuren addiert. Es wurden nur eindeutig festlegbare Querschnitte ausgegeben - alle anderen (z.B. aufgrund der Möglichkeit mehrfachen Abbiegens) wurden dabei ignoriert. Somit war es hier nicht immer möglich, beide Richtungen bei einem Querschnitt auszugeben.

Kanton Luzern - Verkehrserhebung SWISSTRAFFIC

Im November 2018 hat die Swisstraffic im Auftrag der vif eine Umfassende Zählkampagne, mit Kordon-, Knoten- und Querschnittsmessungen im Seetal durchgeführt.

Die Kameradaten wurden in den folgenden Kategorien geliefert: Lastkraftwagen, Personenwagen, sowie Lastkraftwagen und Personenwagen zusammen (Total Fahrzeuge). Dabei wurde auf eine zusätzliche anteilmässige Aufteilung in Fahrzeugklasse (LI und LZ) verzichtet. Folglich wurden hier nur Werte für PW und LW ausgegeben. Die Rohdaten erhielten richtungsgetreunte Werte, welche für die Querschnitte z.T. zusammengefasst wurden. Das bedeutet, dass auf Kreuzungen alle Fahrzeuge, welche aus verschiedenen Richtungen kommen, jedoch in die gleiche Ausfahrt münden, zusammengezählt wurden.

Stadt Luzern – Tiefbauamt

Die Rohdaten enthielten den richtungsgetreunten Totalverkehr, wobei hier DWV, ASP und MSP nur von Dienstag bis Donnerstag definiert sind und nicht wie bei den anderen Quellen von Montag bis Freitag. Die Schätzung der Anteile PW, LI, LW und LZ erfolgte über die DTV Anteile der entsprechenden Klassen im Kanton Luzern (vgl. *Luzern (1/3) – Kanton*). Da an allen Zählstellen an über 30 Tagen der Totalverkehr richtungsgetreunt gemessen wurde, wurden bei allen Zählstellen die Qualitätsstufe 3B festgelegt.

Kanton Aargau

Die Daten waren für den Gebrauch bereits weitgehend bereit. In einem ersten Schritt wurden die durchschnittlichen Schwerverkehrsanteile berechnet. Falls keine Angaben vorhanden waren, wurden die folgenden resultierenden mittleren Schwerverkehrsanteile verwendet: 4.1 % (DTV), 4.8 % (DWV), 5.8 % (MSP) resp. 2.3 % (ASP). In einem zweiten Schritt wurden die Fahrzeugklassenanteile geschätzt. Als Erfahrungswert wurden vom Nicht-Schwerverkehrsanteil 7.5 % als Lieferwagen deklariert, der Rest als Personenwagen. Vom Schwerverkehrsanteil wurden 42.25 % als Last- und Sattelzüge, der Rest als Lastwagen geschätzt. Da die berechneten Werte auf ganze Zahlen gerundet wurden, können geringfügige Unterschiede gegenüber den Originaldaten auftreten. Die Anzahl gemessener Tage musste manuell aus einem separaten Dokument extrahiert werden. Abschliessend wurde die Qualitätsstufe gemäss obenstehender Tabelle festgelegt.

Kanton Zug

Die Rohdaten enthielten richtungsgetreunte, stündlich gemessene Totalwerte für jeweils 1 Woche. Die Fahrzeugklassenanteile wurden über die Anteile im Kanton LU geschätzt. In die Aufbereitung von DWV und DTV wurden aus Gründen der Konsistenz nur Tage miteinbezogen, für welche vollständige

24h-Messwerte vorliegen. Im Kanton Zug gab es eine LSA, welche separat behandelt werden musste, da sich die Datenlage von den übrigen gelieferten Daten unterschieden hat.

Kanton Nidwalden

Die Rohdaten der Messstellen des Kantons Nidwalden waren richtungstrennt und mit Koordinaten versehen. Es wurden permanente sowie temporäre Messstellen geliefert. DTV, DWV, MSP und ASP wurden dabei für die Kategorien Lastkraftwagen, Personenwagen, sowie Lastkraft- und Personenwagen (Total Fahrzeuge) zusammen berechnet.

Überblick

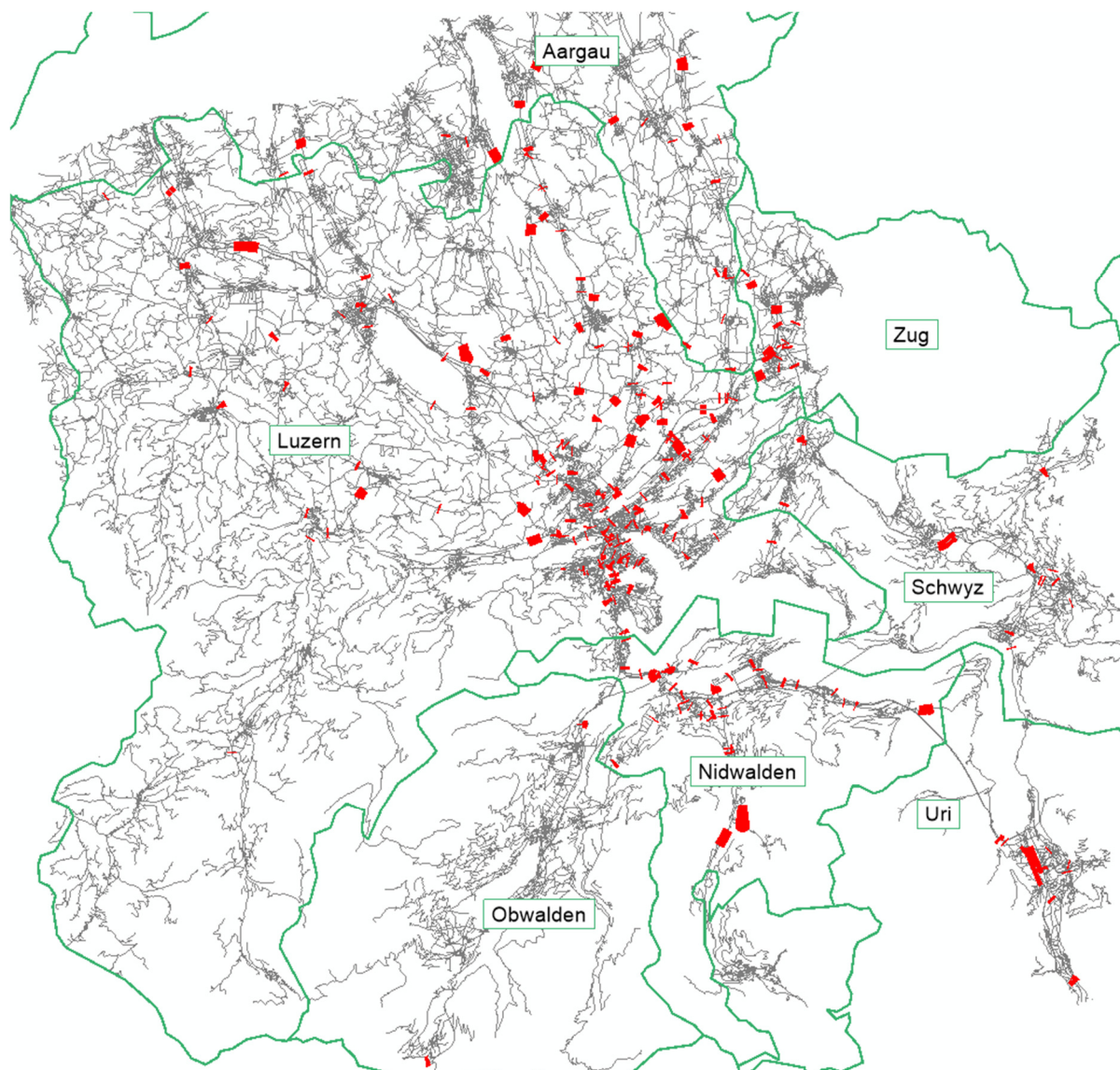
Die nachfolgende Tabelle 19 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Datenquellen, auf welchen die MIV-Zählwerte beruhen. Aufgeführt sind jeweils der Datenlieferant bzw. das Amt, welches für die Zählungen verantwortlich ist, sowie die Anzahl der vorliegenden Querschnitte.

Tabelle 19: Datengrundlage Zähldaten MIV

Datenlieferant	Anzahl Zählwerte
Bundesamt für Strassen (ASTRA)	80
Kanton LU	345
Kanton AG	56
Kanton NW	116
Kanton SZ	52
Kanton ZG	22
Stadt Luzern	120
Swisstraffic	203
Total	994

In Abbildung 26 sind die zuvor aufgeführten Zählstellen auf einer Karte abgebildet.

Abbildung 26: Übersicht Zählstellen MIV GVM LU



Im DWV-Modell wurden die Zähldaten für die Modi PW, LI, LW und LZ als benutzerdefinierte Streckenattribute im Netz eingebaut. Zusätzlich wurde noch die Summe gebildet und so die Anzahl Fahrzeuge abgebildet:

- ZW_DWV_PW
- ZW_DWV_LI
- ZW_DWV_LW
- ZW_DWV_LZ
- ZW_DWV_FZG

Analog dazu wurden dieselben Schritte im MSP-, im ASP sowie im DTV-Modell durchgeführt.

9.2 Zähldaten ÖV

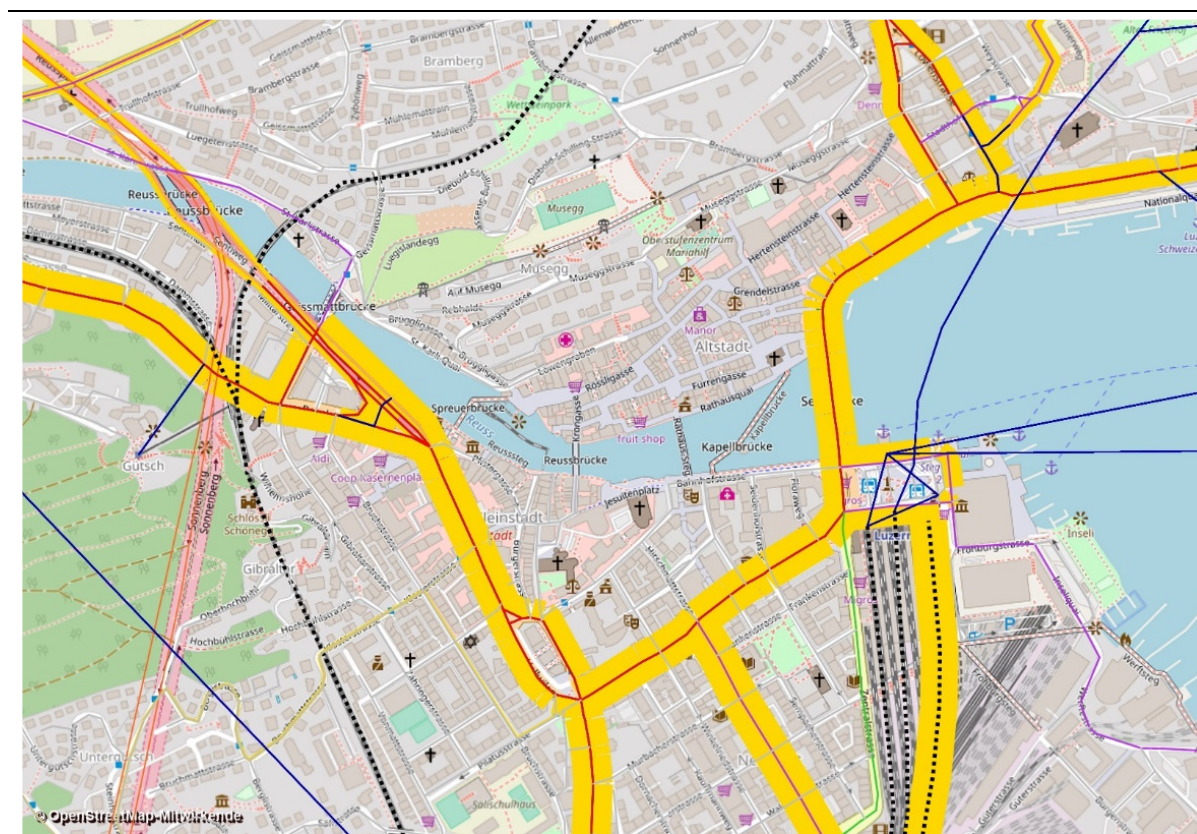
Es wurden Zähldaten der Belegung im ÖV nach Richtung als Streckenattribut (ZW_DWV_OeV_2017, ZW_ASP_OeV_2017, ZW_MSP_OeV_2017 und ZW_DTV_OeV_2017) im Netz eingebaut für:

- den durchschnittlichen Werkverkehr (DWV),
- die Morgenspitzenstunde (MSP) im DWV von 7 bis 8 Uhr, und
- die Abendspitzenstunde (ASP) im DWV von 17 bis 18 Uhr
- den durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV)

Bei der ÖV-Datenaufbereitung ist zwischen den SBB und sonstigen Verkehrsunternehmen zu differenzieren. Von der SBB wurden die Zähldaten getrennt nach Regional- und Fernverkehr für 34 Querschnitte geliefert und mussten nur den entsprechenden Strecken zugeordnet werden.

Bei den sonstigen Unternehmen wurden vom Verkehrsverbund Luzern die Zähldaten im Modellgebiet per Linie und Richtung bestellt. Danach erfolgte die Aufbereitung der Daten und der Einbau derselben als Linienroutenattribut. Insgesamt wurden von 84 Linien die Zählwerte nach Richtung einbaut. Danach erfolgte die Summenbildung der Linienroutenzählwerte auf den befahrenen Strecken. Somit konnte das Modellgebiet flächendeckend mit Zählwerten versorgt werden (vergleiche Abbildung 27).

Abbildung 27: Innenstadt Luzern: DWV-Zählwerte (gelb) auf Strecken summiert



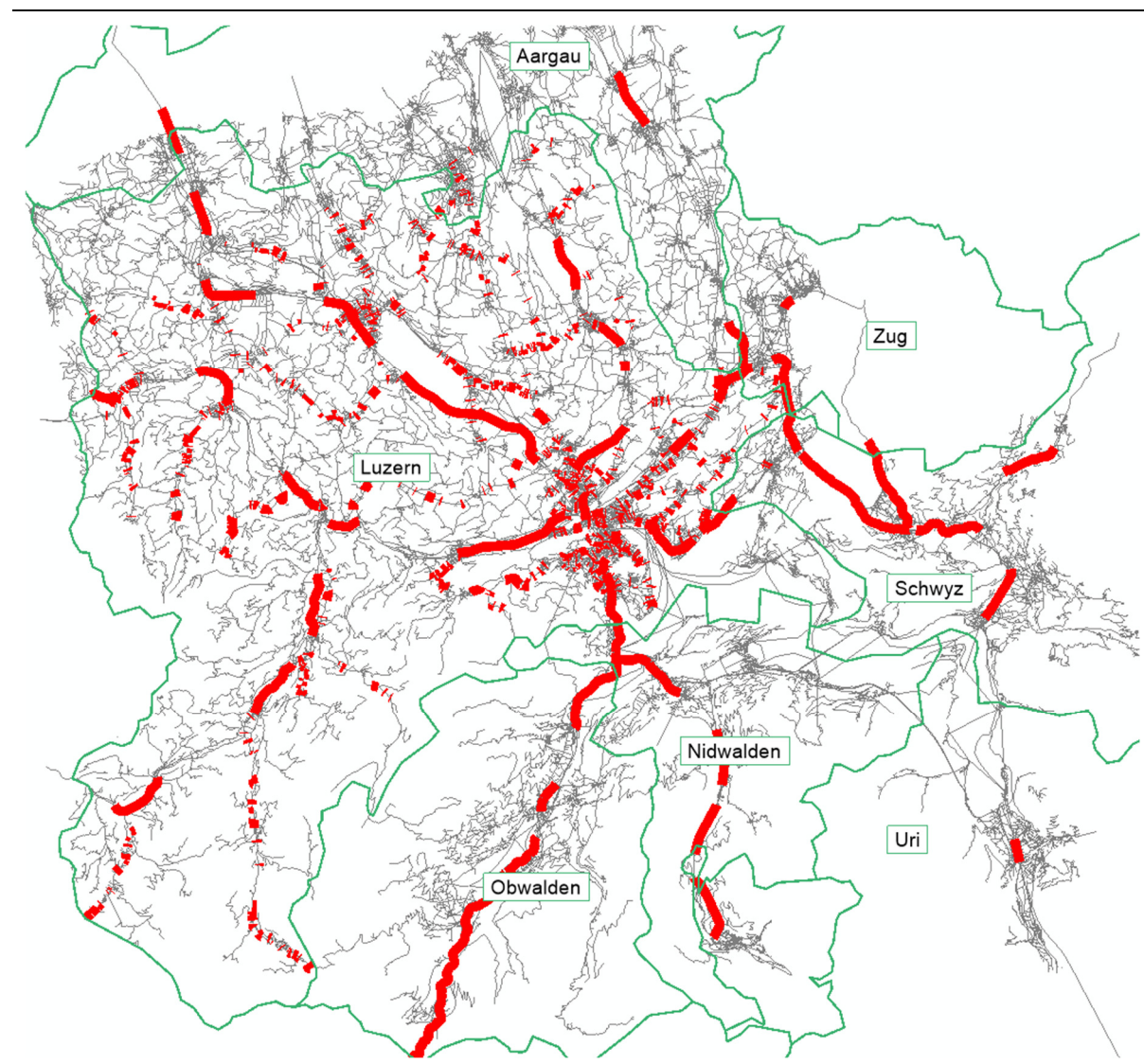
Die nachfolgende Tabelle 20 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Zählstellen des ÖV im GVM LU, aufgeteilt nach Bus, Fernverkehr und Regionalverkehr.

Tabelle 20: Anzahl Zählwerte ÖV GVM LU

Verkehrssystem	Anzahl Zählwerte
Bus	2'548
Fernverkehr / Regionalverkehr	34
Regionalverkehr	80
Total	2'662

In Abbildung 28 sind die zuvor aufgeführten Zählstellen auf einer Karte abgebildet.

Abbildung 28: Übersicht Zählstellen ÖV GVM LU



9.3 Kalibration des DWV-Modells

9.3.1 Vorgehen

Die in den vorherigen Arbeitsschritten erstellten und plausibilisierten Matrizen werden nun auf die Querschnittszählungen geeicht. Die Kalibration der Quelle-Ziel-Matrix kann erst durchgeführt werden, wenn die Zähldaten als plausibel und verlässlich betrachtet werden können. Dafür wird eine Vorab-Analyse der ermittelten Zähldaten durchgeführt.

Die unplausiblen und vor allem mit anderen Querschnitten inkonsistenten Zählstellen werden bei der Kalibration der Matrix nicht berücksichtigt. Ein Teil der unsicheren Zähldaten wird bei der Analyse der Umlegungsergebnisse berücksichtigt, bei der Kalibration der Matrix aber ausgeschlossen (d.h. auf diesen Querschnitten wird die Matrix nicht auf die Zählwerte kalibriert). Durch die Filtrierung der unplausiblen Zählstellen wird eine Verfälschung der Quelle-Ziel-Matrix verhindert.

Neben plausiblen Zählstellen ist für die Kalibration der Matrix eine plausible bzw. fehlerfreie Abbildung des Routenwahlverhaltens eine wesentliche Voraussetzung. Ein verfälschtes Routenwahlverhalten wird in der Regel durch folgende Faktoren verursacht:

- Fehler im abgebildeten Verkehrsangebot (Abbiegerverbote, zugelassene Geschwindigkeit, Streckenkapazität, Einbahnstrassen, Linienverlauf etc.);
- nicht der Realität entsprechende Zonenanbindungen oder fehlerhafte Anbindungsanteile;
- Inkonsistenz in Netz- und Zonendichte;
- unplausible Routenwahlparameter und Ansätze für die Nachfrageaufteilung

Für die Validierung der Modellergebnisse hat die Dichte und Qualität der Zählstellen eine zentrale Bedeutung. Neben der Anzahl Zählstellen, respektive ihrer Dichte, ist hier vor allem die Konsistenz der erhobenen Querschnittsbelastungen wichtig. In diesem Projekt musste vor allem der zweite Punkt, d.h. die Konsistenz der erhobenen Querschnittsbelastungen, kritisch validiert werden. Es hat sich gezeigt, dass sowohl im ÖV als auch im MIV bestimmte Zählwerte bei der Modellkalibration ausgeschlossen werden müssen. Im MIV liegt die Ursache vor allem bei der unterschiedlichen Erhebungsmethodik einzelner Datenquellen sowie der Streckenzuordnung einzelner Zählstellen. Im ÖV musste vor allem die Vollständigkeit der Querschnittsbelastungen, als auch die Zuordnung der Linienbelastungen zu den Strecken, überprüft werden. Bei einzelnen Abschnitten konnten die erhobenen Belastungen nicht nachvollzogen werden und wurden als Zählwerte ausgeschlossen.

Da die inhaltliche Struktur der erstellten Matrizen den Erhebungsdaten sehr gut entspricht und die Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen sehr ausgeglichen und relativ klein sind, wird in diesem Projekt auf die Anwendung von automatischen Kalibrationsverfahren verzichtet. Die Differenzen zwischen den Umlegungsergebnissen und den Querschnittszählungen werden stattdessen durch ein sukzessives Optimierungsverfahren an einzelnen Querschnitten (siehe unten) korrigiert. Ein solches Vorgehen hat den wesentlichen Vorteil, dass die strukturellen Veränderungen der Matrix kontrolliert werden können. Damit kann eine unplausible Veränderung der Matrixstruktur verhindert werden.

Diese Art des Vorgehens ist allerdings nur möglich, wenn die Ausgangsstruktur der Matrix korrekt ist und die Differenzen zwischen den Umlegungsbelastungen und den Querschnittszählungen über das gesamte Netz konsistent sind. Dies bedeutet, dass durch die Korrektur der Teilmatrix auf einem Querschnitt die Differenzen zwischen der Umlegungsbelastung und dem Zählwert auf einem anderen Querschnitt nicht erhöht werden dürfen. Der Nachteil eines solchen Vorgehens ist, dass es einen grösseren Zeitaufwand erfordert.

Nachdem alle Fehler im Verkehrsangebot und in den Zonenanbindungen korrigiert worden sind, ist ersichtlich auf welchen Querschnitten die Matrix geeicht werden muss. Diese Abweichungen können bei Makromodellen, in denen mit einem durchschnittlichen Verkehrsverhalten (einheitliche Modellparameter für alle Quelle-Ziel-Beziehungen) gerechnet wird, nicht verhindert werden. Wegen der unterschiedlichen soziodemographischen Charakteristiken und der Unterschiede bei den Verkehrsangebotscharakteristiken ist zu erwarten, dass Abweichungen in den Gesetzmässigkeiten zwischen einzelnen Quelle-Ziel-Beziehungen vorhanden sind. Diese Abweichungen lassen sich aber durch die hier verwendeten manuellen Kalibrationsverfahren sehr plausibel korrigieren.

Daran anschliessend wird zur Korrektur der vorhandenen Differenzen zwischen den Umlegungsbelastungen und den Zählwerten eine Spinnenanalyse der einzelnen Querschnitte durchgeführt. Aus der Analyse der Verkehrsstromverteilung und dem Vergleich der Abweichungen auf anderen Zählstellen über die die Spinnenströme verlaufen, ist es möglich zu bestimmen, welche Ströme unter- bzw. überschätzt sind. Bei einer korrekten Matrixstruktur sollte, wie vorher bereits erwähnt wurde, durch die Korrektur aller über den Querschnitt fahrenden Ströme die Abweichungen auf anderen Querschnitten nicht erhöht werden. Wäre dies der Fall, dürften nur Teilströme korrigiert werden.

Das folgende Vorgehen wird bei der Kalibration angewendet:

Für die Querschnitte mit Abweichungen wird eine Spinnenmatrix erstellt und entsprechend der Differenz zwischen der Umlegungsbelastung und dem Zählwert korrigiert. Welche Ströme korrigiert werden sollen und mit welchem Korrekturfaktor dies geschehen soll, wird aus den Abweichungen am betrachteten Querschnitt und aus der Stromverteilung der betroffenen Zählstellen ermittelt.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Kalibration sowie die dadurch ermittelten Veränderungen der Matrix und der Querschnittbelastungen dargestellt. Dafür wurden die nachstehenden Auswertungen der kalibrierten bzw. endgültigen Matrizen durchgeführt:

- Eckwerte der einzelnen Matrizen und Reiseweiteverteilungen vor (EVA-Ausgangsmatrix) und nach der Kalibration;
- Netzbelastungen und Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen;
- Analyse der Quelle-Ziel-Ströme bzw. Spinnenanalyse auf einzelnen Querschnitten.

9.3.2 Ergebnisse Eckwerte

Kalibriert wurde für alle Nachfragesegmente die gesamte Matrix ohne Unterscheidung des Fahrtzwecks. Aus den kalibrierten PW- und ÖV-Matrizen wurden dann in einem weiteren Schritt die Matrizen nach Fahrtzweck berechnet. Die Fahrtzweckanteile jeder Quelle-Ziel-Beziehung wurden dabei aus der Ausgangsmatrix beibehalten. Die Eckwerte der Ausgangsmatrizen sowie der kalibrierten Matrizen sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Eckwerte der Matrizen vor und nach der Kalibration

Verkehrsmittel	Vor Kalibration	Nach Kalibration	Veränderung [%]
MIV (PW-Fahrten)	1'239'963	1'331'416	7.40
ÖV (Personenwege)	346'435	295'768	-14.63

Wie zu sehen ist, wurde die MIV-Matrix um ca. 7 % erhöht und die ÖV-Matrix gegenüber der erstellten Ausgangsmatrix um ca. 15 % reduziert. Diese Veränderungen sind vor allem auf die Feinkorrektur der Streckenbelastungen auf lokalen Strecken sowie auf den auf die MZMV 2015 kalibrierten und dadurch überschätzten ÖV-Anteil zurückzuführen.

Die gesamte Anzahl an Wegen sowie die berechneten Personenkilometer und die mittlere Reiseweite der kalibrierten Quelle-Ziel-Matrix nach Fahrtzwecken sind in Tabelle 22 (MIV) und Tabelle 23 (ÖV) dargestellt. Um aus den PW-Fahrten die entsprechende Anzahl der Wege zu erhalten, wurden sie zusätzlich mit dem fahrtzweckspezifischen PW-Besetzungsgrad multipliziert.

Tabelle 22: Verkehrsaufkommen und -leistungen der kalibrierten Quelle-Ziel-Matrix – MIV

Fahrtzweck	Personenwege	Personenkilometer	Mittlere Weglänge [km]
Arbeit	610'981	6'475'971	10.60
Ausbildung	44'727	424'446	9.47
Einkauf	355'411	2'715'580	7.66
Nutzfahrt	167'466	1'854'442	11.09
Freizeit	617'156	6'816'927	11.25
Alle	1'795'740	18'287'365	10.26

Tabelle 23: Verkehrsaufkommen und -leistungen der kalibrierten Quelle-Ziel-Matrix – ÖV

Fahrtzweck	Personenwege	Personenkilometer	Mittlere Weglänge [km]
Arbeit	107'103	2'079'221	19.41
Ausbildung	20'588	297'325	14.44
Einkauf	34'483	346'975	10.06
Nutzfahrt	12'239	424'101	34.65
Freizeit	121'352	2'525'089	20.81
Alle	295'768	5'672'711	19.18

Zur Berechnung der PW-Fahrten für das MIV-Modell wurden die in Tabelle 24 dargestellten Besetzungsgrade verwendet. Hier sollte beachtet werden, dass die Besetzungsgrade für das gesamte Modellgebiet gelten und nicht pauschal für einzelne Gebietsteile verwendet werden sollten. Die aus den angenommenen Besetzungsgraden berechneten Fahrzeugfahrten und Fahrzeugkilometer für das betrachtete Modellgebiet sind ebenfalls in der Tabelle dargestellt. Hier ist zu sehen, dass im GVM LU ca. 1.3 Mio. PW-Fahrten und ca. 13.3 Mio. PWkm pro Tag erzeugt werden. Die Fahrleistung innerhalb des Kantons Luzern beträgt ca. 8.2 Mio PWkm.

Tabelle 24: Verkehrsaufkommen und Fahrleistungen im DWV (MIV)

Fahrtzweck	Personenwege	Besetzungsgrad [Personen/PW]	PW-Fahrten	Fahrleistung [PWkm] (Modellgebiet)	Fahrleistung [PWkm] (Kanton LU)
Arbeit	610'981	1.11	550'433	5'775'587	3'691'828
Ausbildung	44'727	1.88	23'791	216'137	109'860
Einkauf	355'411	1.41	252'064	1'878'842	1'060'411
Nutzfahrt	167'466	1.60	104'667	1'134'221	632'852
Freizeit	617'156	1.51	400'461	4'322'806	2'669'298
Alle	1'795'740	1.34	1'331'416	13'327'863	8'164'250

Tabelle 25 zeigt die analoge Auswertung für den ÖV. Hier beträgt die Verkehrsleistung im Modellgebiet (GVM LU) ca. 4.4 Mio Pkm, im Kanton Luzern ca. 3.1 Mio Pkm.

Tabelle 25: Verkehrsaufkommen und Fahrleistungen im DWV (ÖV)

Fahrtzweck	Personenwege	Verkehrsleistung [Pkm] (Modellgebiet)	Verkehrsleistung [Pkm] (Kanton LU)
Arbeit	107'103	1'648'622	1'195'929
Ausbildung	20'588	267'530	206'155
Einkauf	34'483	329'248	215'363
Nutzfahrt	12'239	295'983	221'226
Freizeit	121'352	1'854'200	1'307'495
Alle	295'764	4'395'582	3'146'168

Die Fahrtzweckanteile in Bezug auf das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistungen sind in Tabelle 26 dargestellt. Es ist festzustellen, dass im MIV die Arbeits-, Einkaufs- und Freizeitwege dominierend sind und 90 % aller Personenwege sowie -kilometer übernehmen. Ähnliche Verhältnisse sind auch im ÖV festzustellen.

Im Vergleich mit den Fahrtzweckanteilen aus dem Nachfragemodell (nur Binnenverkehr) findet im Umlegungsmodell (inkl. Aussenverkehr) sowohl im MIV als auch im ÖV eine Verschiebung zu Gunsten der längeren Arbeits- und vor allem Freizeitwege statt.

Tabelle 26: Fahrtzweckanteile in Bezug auf die Personenfahrten und -kilometer der kalibrierten Quelle-Ziel-Matrix

Fahrtzweck	MIV	
	Anteil Personenwege [%]	Anteil Personenkilometer [%]
Arbeit	41.3	43.3
Ausbildung	1.8	1.6
Einkauf	18.9	14.1
Nutzfahrt	7.9	8.5
Freizeit	30.1	32.4
Fahrtzweck	ÖV	
	Anteil Personenwege [%]	Anteil Personenkilometer [%]
Arbeit	36.2	37.5
Ausbildung	7.0	6.1
Einkauf	11.7	7.5
Nutzfahrt	4.1	6.7
Freizeit	41.0	42.2

Die Modal-Split-Anteile zwischen MIV und ÖV (ohne Fuss- und Veloverkehr) der kalibrierten Matrix (inklusive Aussenverkehr) sind bezogen auf das Verkehrsaufkommen in Tabelle 27 und bezogen auf die Personenkilometer in Tabelle 28 dargestellt. Der MIV-Anteil beträgt bezogen auf die Wege bei allen Fahrtzwecken, mit Ausnahme des Ausbildungsverkehrs, über 75 %. Der ÖV-Anteil in Bezug auf die Personenkilometer steigt gegenüber den Personenwegen von 14 % auf ca. 19 %.

Tabelle 27: Modal-Split-Anteile der kalibrierten Quelle-Ziel-Matrix in Bezug auf die Personenwege

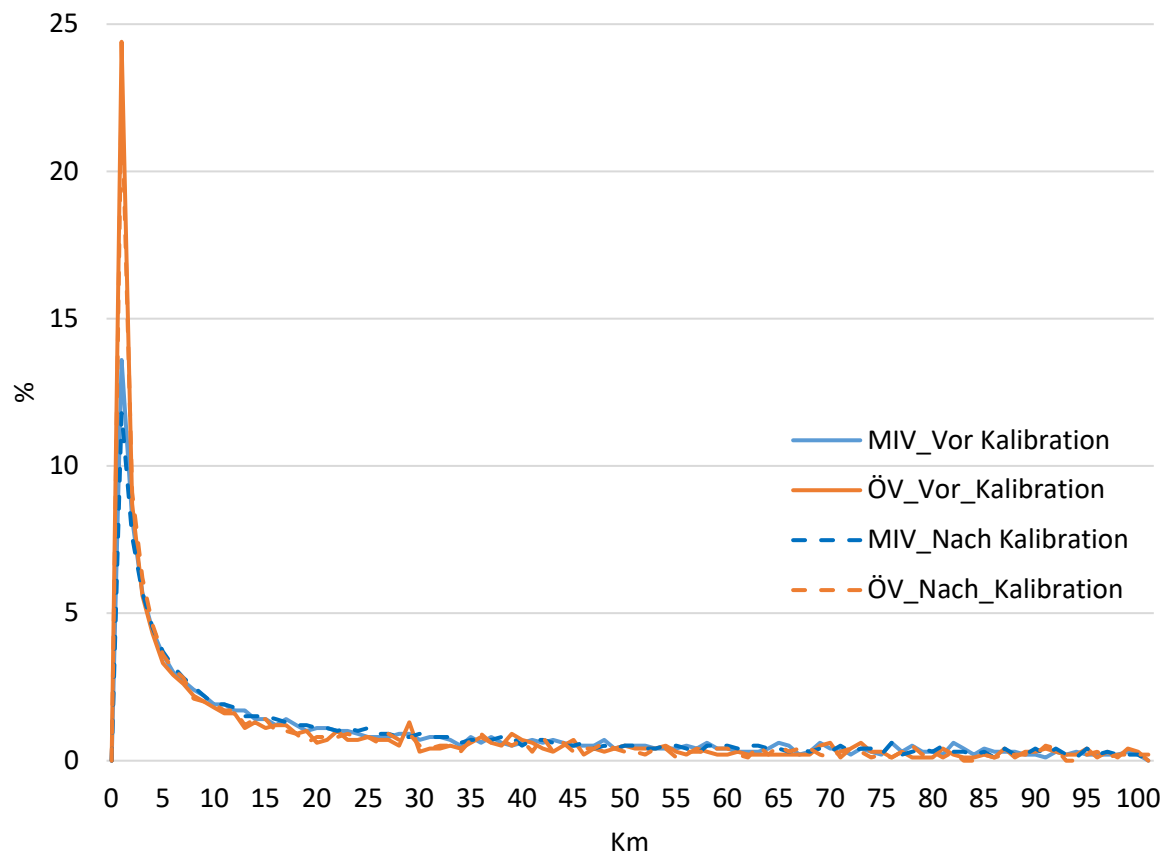
Fahrtzweck	Anteil Personenwege [%]	
	MIV	ÖV
Arbeit	85.1	14.9
Ausbildung	68.5	31.5
Einkauf	91.2	8.8
Nutzfahrt	93.2	6.8
Freizeit	83.6	16.4
Alle	85.9	14.1

Tabelle 28: Modal-Split-Anteile der kalibrierten Quelle-Ziel-Matrix in Bezug auf die Personenkilometer

Fahrtzweck	Anteil Personenkilometer [%]	
	MIV	ÖV
Arbeit	79.5	20.5
Ausbildung	60.3	39.7
Einkauf	88.9	11.1
Nutzfahrt	86.0	14.0
Freizeit	77.9	22.1
Alle	80.2	19.8

Wie Abbildung 29 zeigt, hat sich die Weglängenverteilung durch die Kalibration der Matrizen nicht verändert, womit das wichtige Qualitätskriterium der Konsistenz zwischen den kalibrierten Matrizen und dem Nachfragemodell eingehalten worden ist.

Abbildung 29: Weglängenverteilung kalibrierter vs. unkalibrierter Modellzustand



9.3.3 Ergebnisse Netzbelastungen

Tabelle 29 zeigt die wichtigsten Kennzahlen der Kalibration für jedes Nachfragesegment:

- die Anzahl Zählstellen, welche als plausibel angesehen und somit zum Vergleich mit den ermittelten Streckenbelastungen herangezogen wurden;
- die Mittelwerte der Querschnittszählungen auf diesen Strecken;
- die mittleren relativen Differenzen zwischen Belastungen und Zählwerten (über alle Strecken);
- die Gütemasse (R²) der Regressionsrechnungen.

Tabelle 29: Vergleich der kalibrierten Streckenbelastungen mit den Querschnittszählungen (DWV)

Nachfragesegment	Anzahl Zählwerte	Mittlerer Zählwert	Mittlere rel. Differenz [%]	R ²
PW	906	4'997	5.4	0.99
Lieferwagen	640	482	5.1	0.99
Lastwagen	669	202	4.9	0.99
Last- und Sattelzüge	668	105	5.0	0.99
MIV total	1'046	5'825	5.3	0.99
ÖV	2'662	1'033	5.4	1.00

Die folgenden Abbildungen zeigen für jeden Netzzustand und jedes Nachfragesegment die Detailauswertungen der Kalibrationen. Aufgezeichnet sind jeweils die Zählwerte gegen die aus dem Modell resultierenden Streckenbelastungen; Die rot gestrichelte Gerade entspricht der ermittelten Regressionsgeraden, die grüne Linie dem „Idealfall“, in welchem alle Streckenbelastungen genau den Querschnittszählungen entsprechen würden. Es ist ersichtlich, dass die Kalibration insgesamt zu sehr guten Ergebnissen geführt hat.

Es muss beachtet werden, dass bei der Eichung des Modells alle Modellkomponenten soweit wie möglich realitätsentsprechend dargestellt werden. Dies bedeutet, dass sowohl Inputdaten wie Netzattribute und Modellparameter als auch die Matrixstruktur und die daraus abgeleiteten Streckenbelastungen korrekt abgebildet werden sollen. Die hier berechneten Differenzen sind eine weitere Bestätigung der genügenden Konsistenz des gesamten Modells.

Des Weiteren ist zu beachten, dass bei der Erstellung von Netzmodellen eine vollständige Konsistenz mit allen Erhebungsdaten und damit auch mit den Querschnittszählungen kaum möglich ist. Die Unsicherheiten und die Fehler bei den Erhebungsdaten (sowohl bei den Zählwerten als auch bei den Angebots- und anderen Nachfragedaten) sowie die Inkonsistenz zwischen Zonengrösse und Netzdichte führen in der Regel dazu, dass eine vollständige Konsistenz kaum zu erreichen ist. Insbesondere können im DWV- und DTV-Modell Asymmetrien in den Zählwerten mit den vorliegenden symmetrischen Quelle-Ziel-Matrizen nicht vollständig abgebildet werden. Zusätzlich müssen auch die Genauigkeit der Zählwerte, insbesondere die differenzierte Betrachtung nach Fahrzeugkategorien (bzw. deren Fehlen) und die im Verlauf des Projekts dargestellten Unstimmigkeiten berücksichtigt werden.

Abbildung 30: Vergleich der Streckenbelastungen (DWV) Modell vs. Zählung – PW (nach Kalibration)

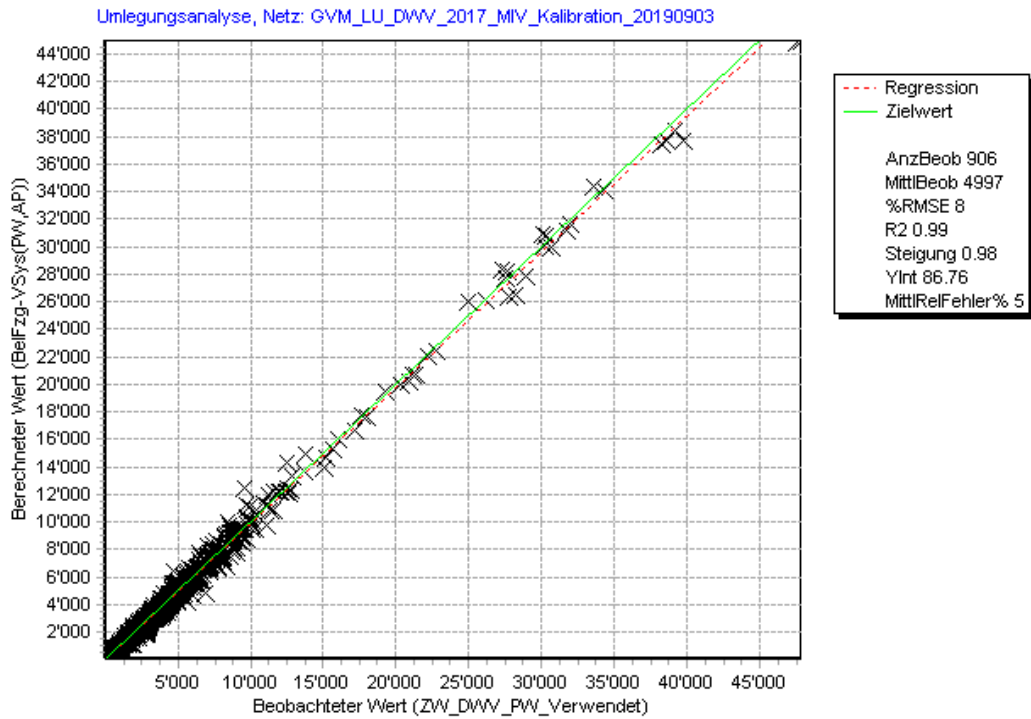


Abbildung 31: Darstellung der Streckenbelastungen (DWV, Agglo Luzern) Modell vs. Zählung – PW (nach Kalibration)



Gelb: Zählwert; rot: Modellbelastung höher als Zählwert; grün: Modellbelastung tiefer als Zählwert

Abbildung 32: Vergleich der Streckenbelastungen (DWV) Modell vs. Zählung – Lieferwagen (nach Kalibration)

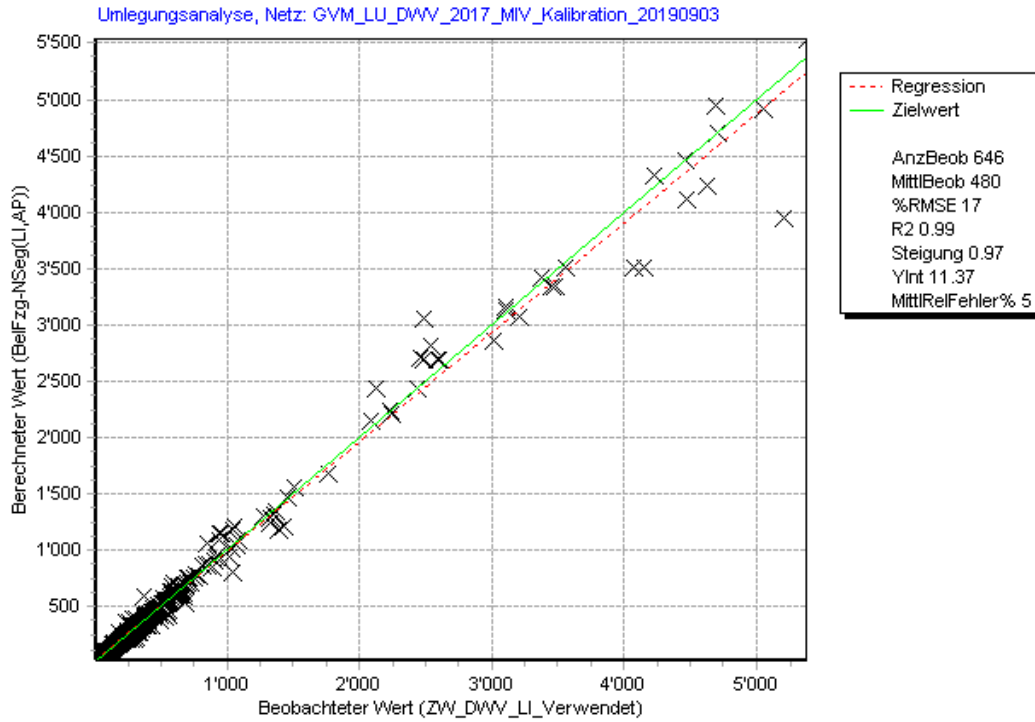


Abbildung 33: Vergleich der Streckenbelastungen (DWV) Modell vs. Zählung – Lastwagen (nach Kalibration)

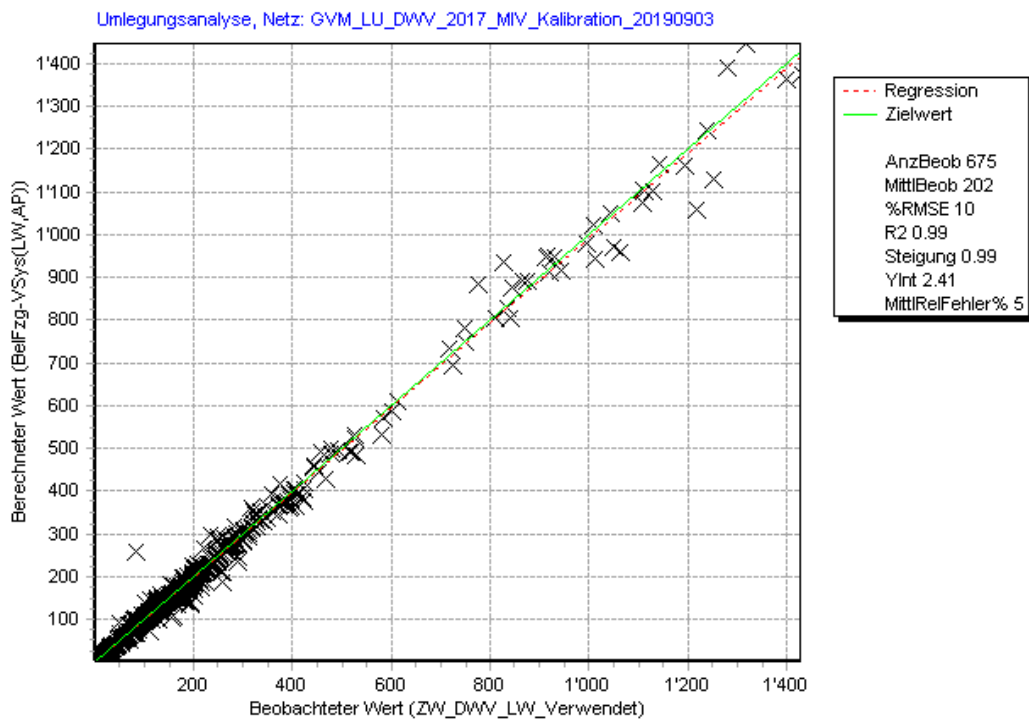


Abbildung 34: Vergleich der Streckenbelastungen (DWV) Modell vs. Zählung – Last- und Sattelzüge (nach Kalibration)

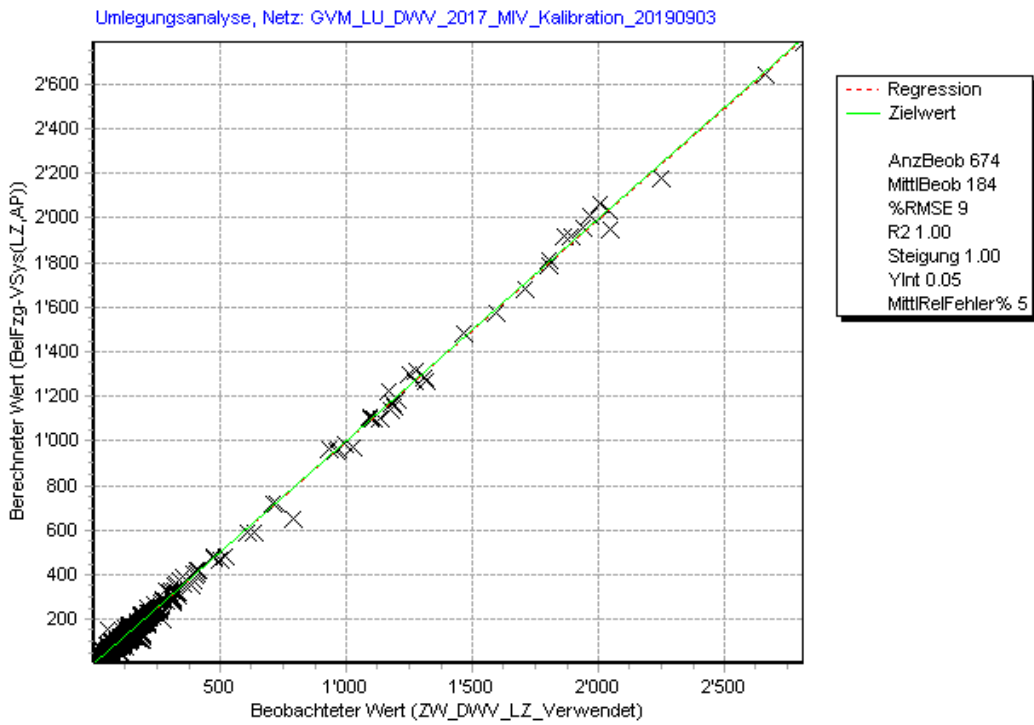


Abbildung 35: Vergleich der Streckenbelastungen (DWV) Modell vs. Zählung – MIV (nach Kalibration)

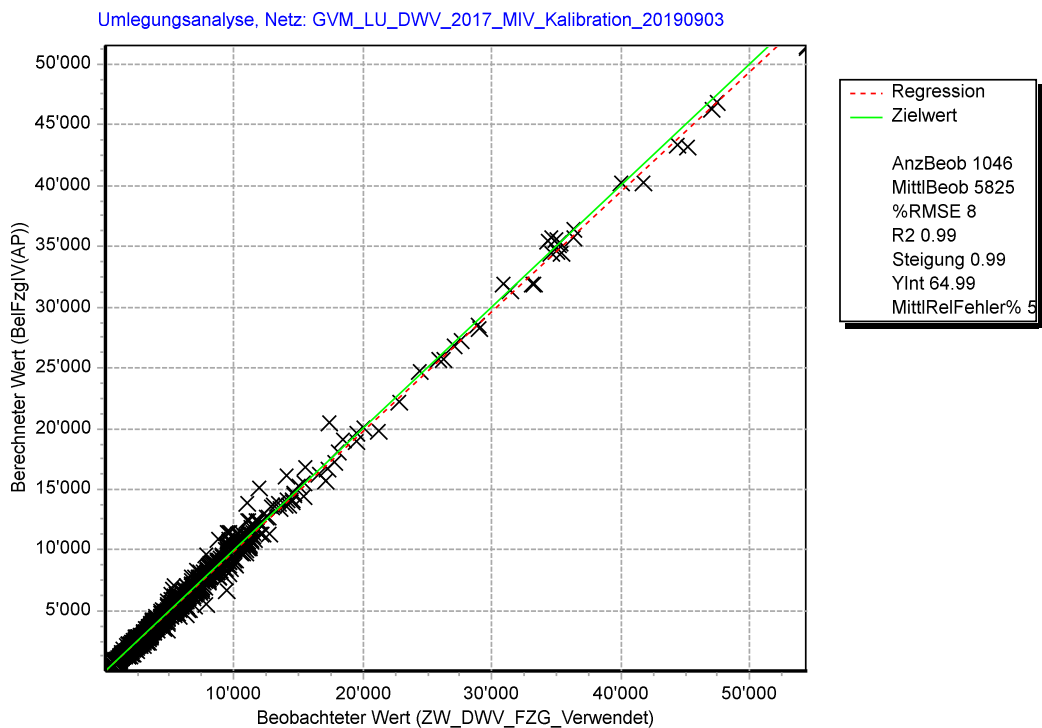


Abbildung 36: Vergleich der Streckenbelastungen (DWV) Modell vs. Zählung – ÖV (nach Kalibration)

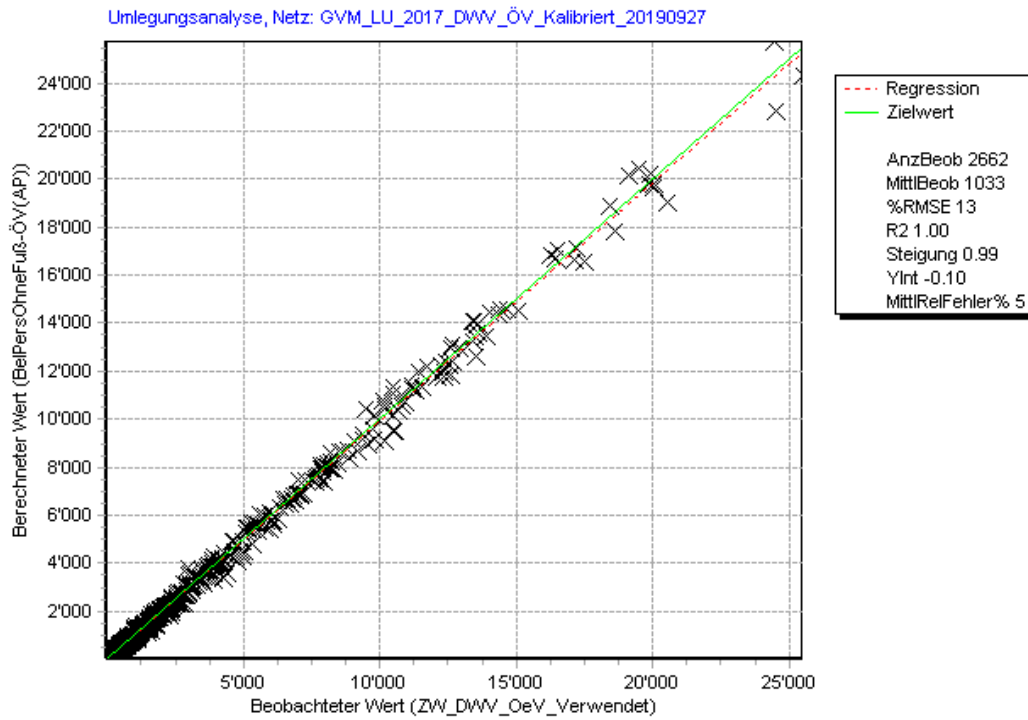
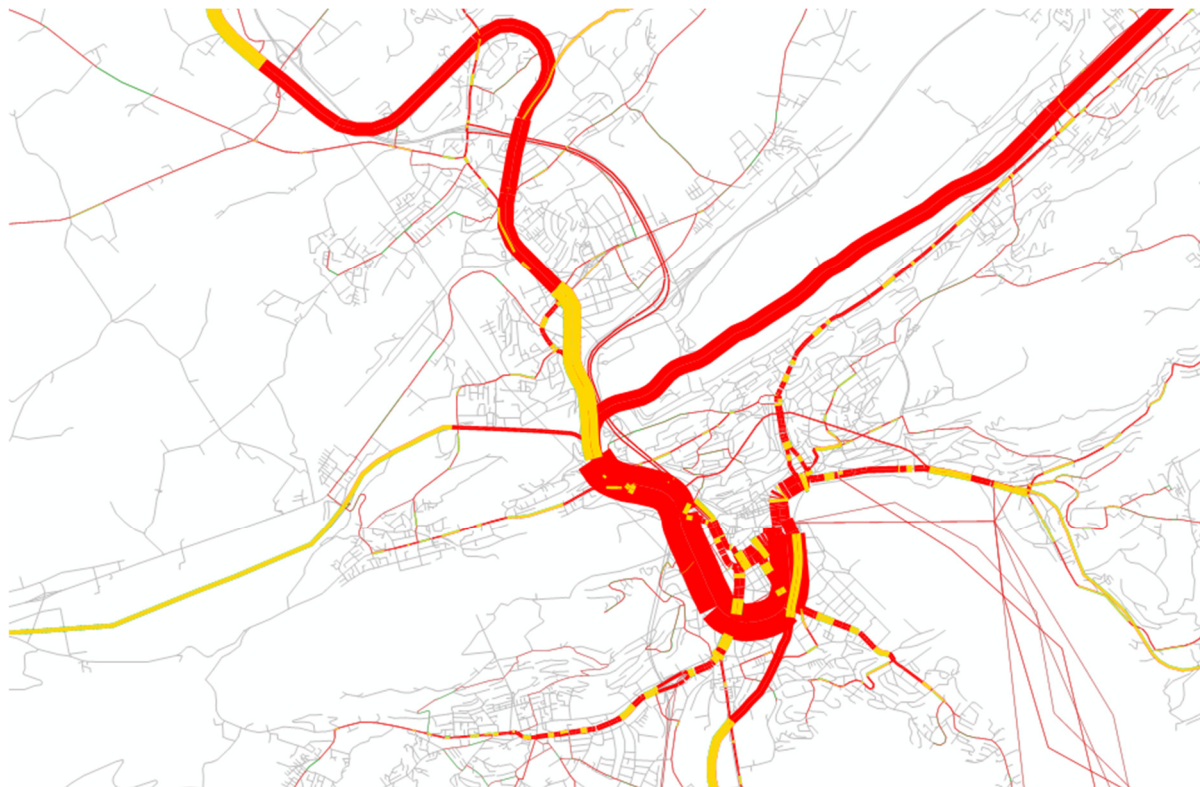


Abbildung 37: Darstellung der Streckenbelastungen (DWV, Agglo Luzern) Modell vs. Zählung – ÖV (nach Kalibration)



Gelb: Zählwert; rot: Modellbelastung höher als Zählwert; grün: Modellbelastung tiefer als Zählwert

9.4 Kalibration des MSP-Modells

Dieser Abschnitt zeigt analog zum DWV-Modell die Ergebnisse der Kalibration des MSP-Modells.

9.4.1 Ergebnisse Netzbelastungen

Tabelle 30: Vergleich der kalibrierten Streckenbelastungen mit den Querschnittszählungen (MSP)

Nachfragesegment	Anzahl Zählwerte	Mittlerer Zählwert	Mittlere rel. Differenz [%]	R2
PW	615	416	6.0	0.99
Lieferwagen	612	38	6.8	0.98
Lastwagen	607	16	5.2	0.99
Last- und Sattelzüge	594	14	5.6	1.00
MIV total	1'068	421	6.2	0.99
ÖV	2'670	102	5.6	0.99

Abbildung 38: Vergleich der Streckenbelastungen (MSP) Modell vs. Zählung – PW (nach Kalibration)

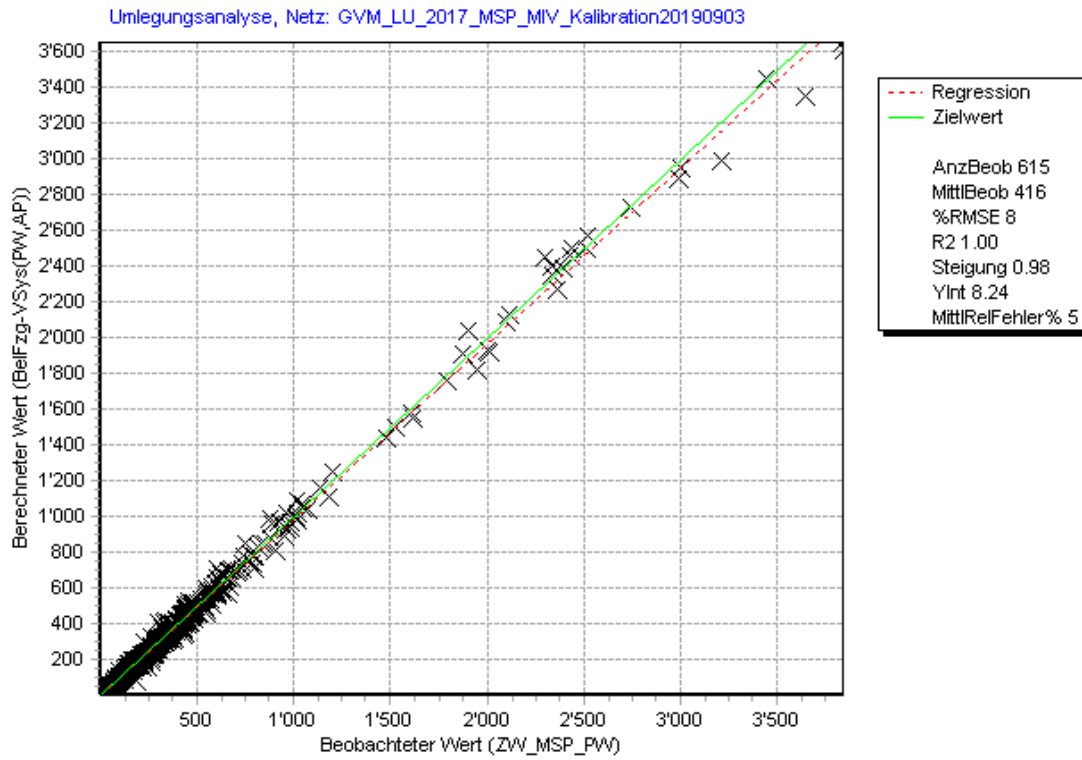


Abbildung 39: Vergleich der Streckenbelastungen (MSP) Modell vs. Zählung – Lieferwagen (nach Kalibration)

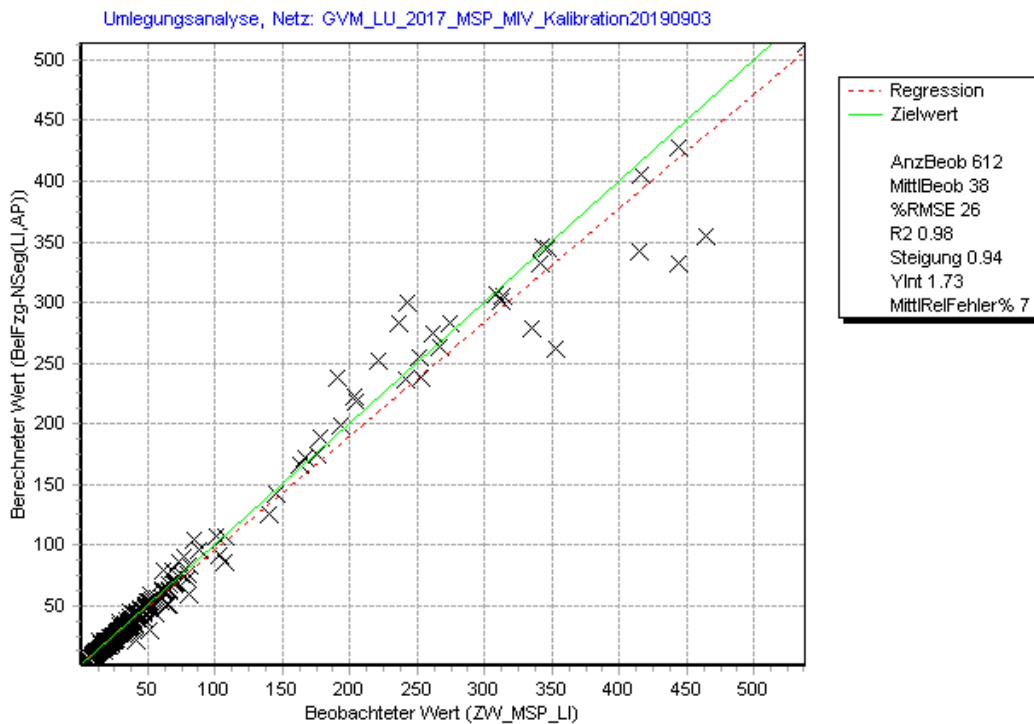


Abbildung 40: Vergleich der Streckenbelastungen (MSP) Modell vs. Zählung – Lastwagen (nach Kalibration)

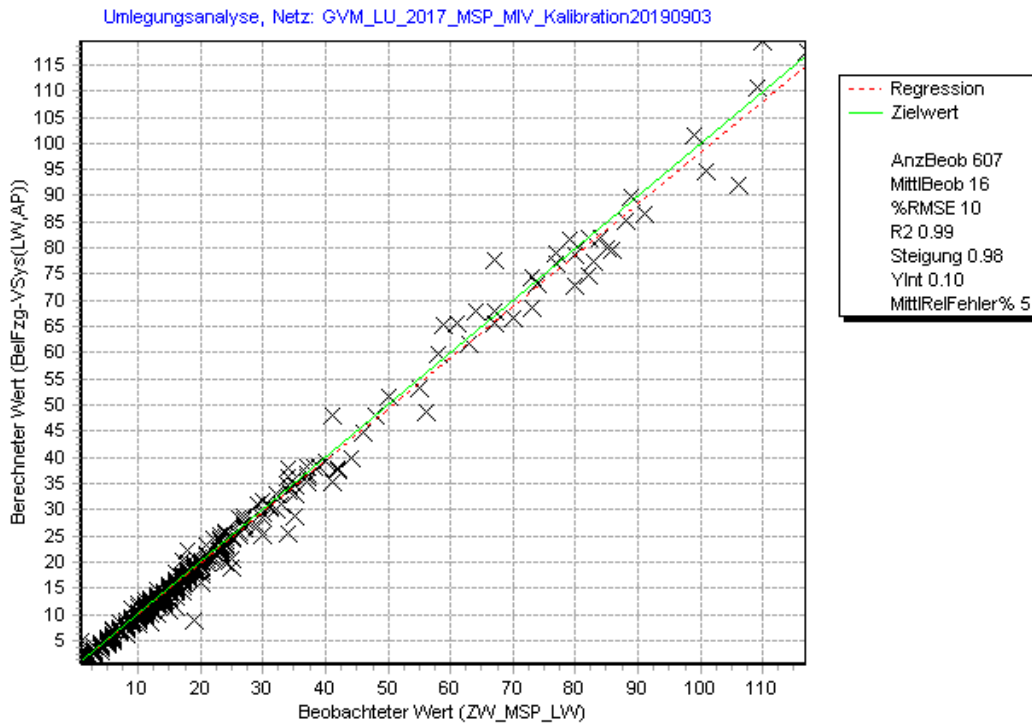


Abbildung 41: Vergleich der Streckenbelastungen (MSP) Modell vs. Zählung – Last- und Sattelzüge (nach Kalibration)

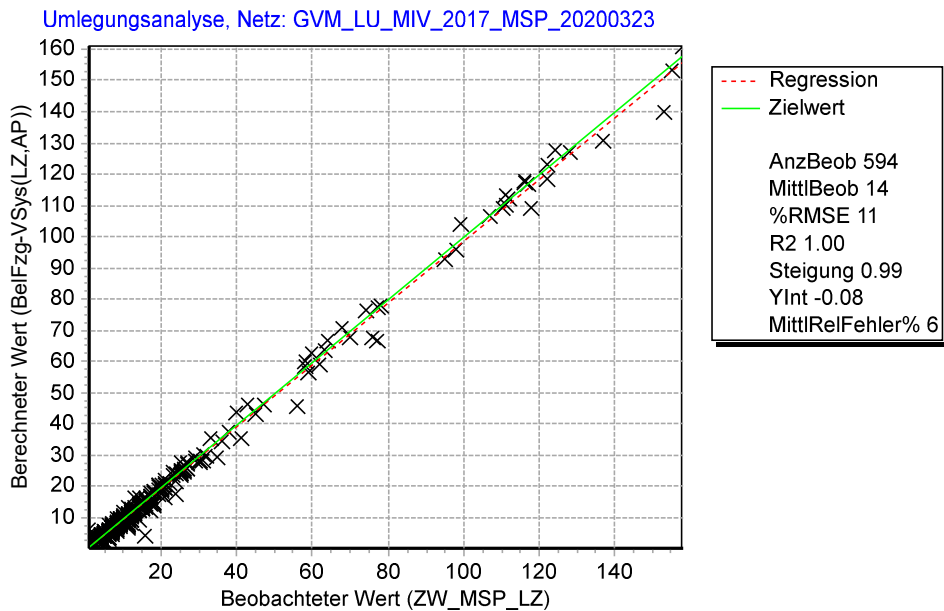


Abbildung 42: Vergleich der Streckenbelastungen (MSP) Modell vs. Zählung – MIV (nach Kalibration)

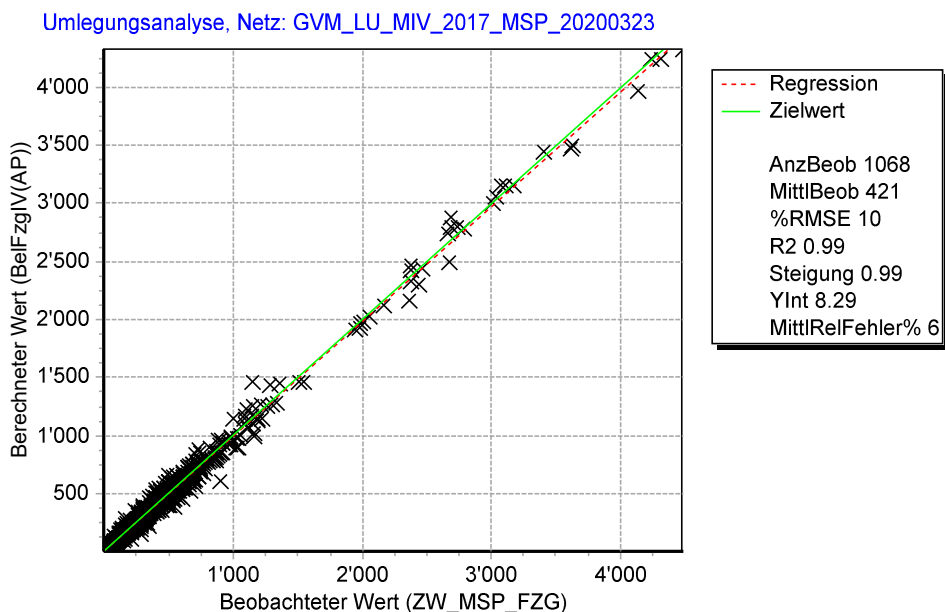
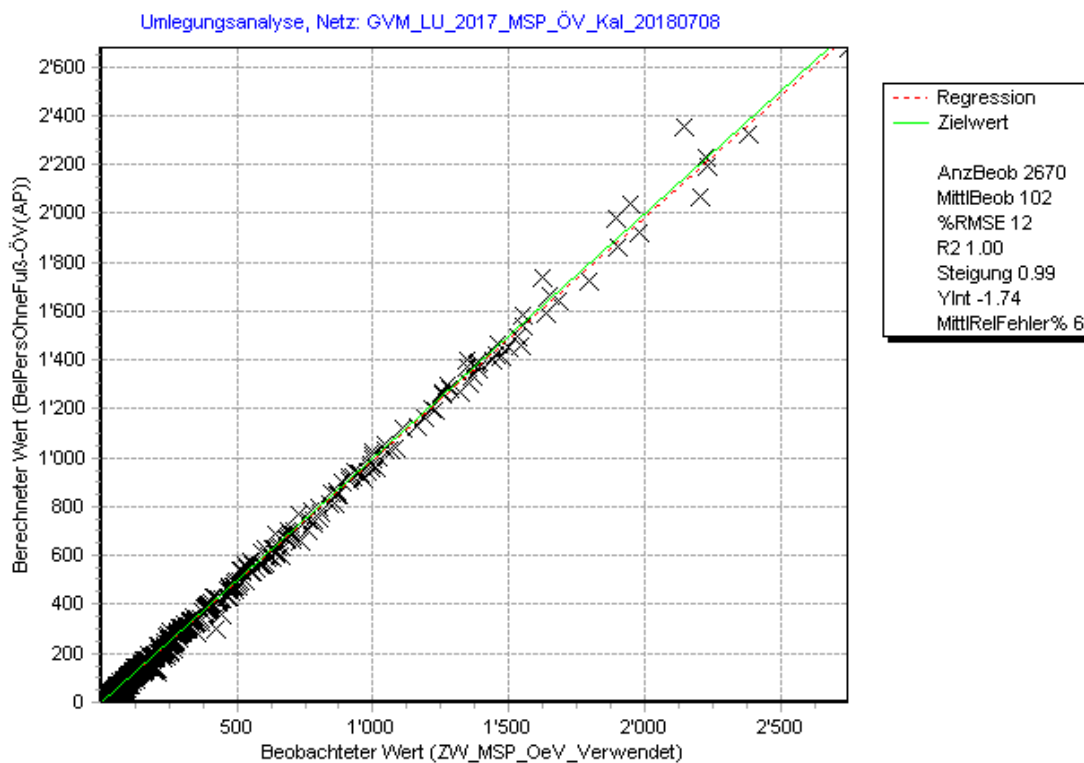


Abbildung 43: Vergleich der Streckenbelastungen (MSP) Modell vs. Zählung – ÖV (nach Kalibration)



9.5 Kalibration des ASP-Modells

Dieser Abschnitt zeigt analog zum DWV-Modell die Ergebnisse der Kalibration des ASP-Modells.

9.5.1 Ergebnisse Netzbelastungen

Tabelle 31: Vergleich der kalibrierten Streckenbelastungen mit den Querschnittszählungen (ASP)

Nachfragesegment	Anzahl Zählwerte	Mittlerer Zählwert	Mittlere rel. Differenz [%]	R2
PW	615	521	4.4	1.00
Lieferwagen	615	40	5.9	0.98
Lastwagen	610	14	7.5	0.96
Last- und Sattelzüge	587	14	5.2	1.00
MIV total	1'119	503	6.2	0.99
ÖV	2'667	107	4.8	1.00

Abbildung 44: Vergleich der Streckenbelastungen (ASP) Modell vs. Zählung – PW (nach Kalibration)

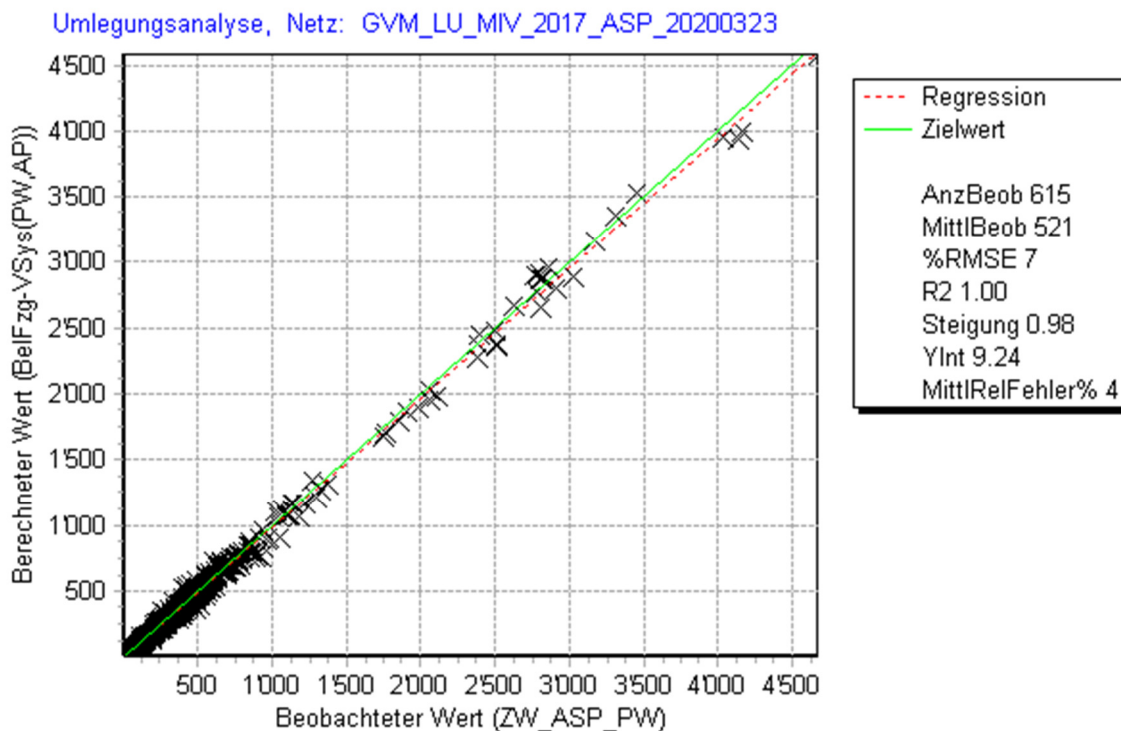


Abbildung 45: Vergleich der Streckenbelastungen (ASP) Modell vs. Zählung – Lieferwagen (nach Kalibration)

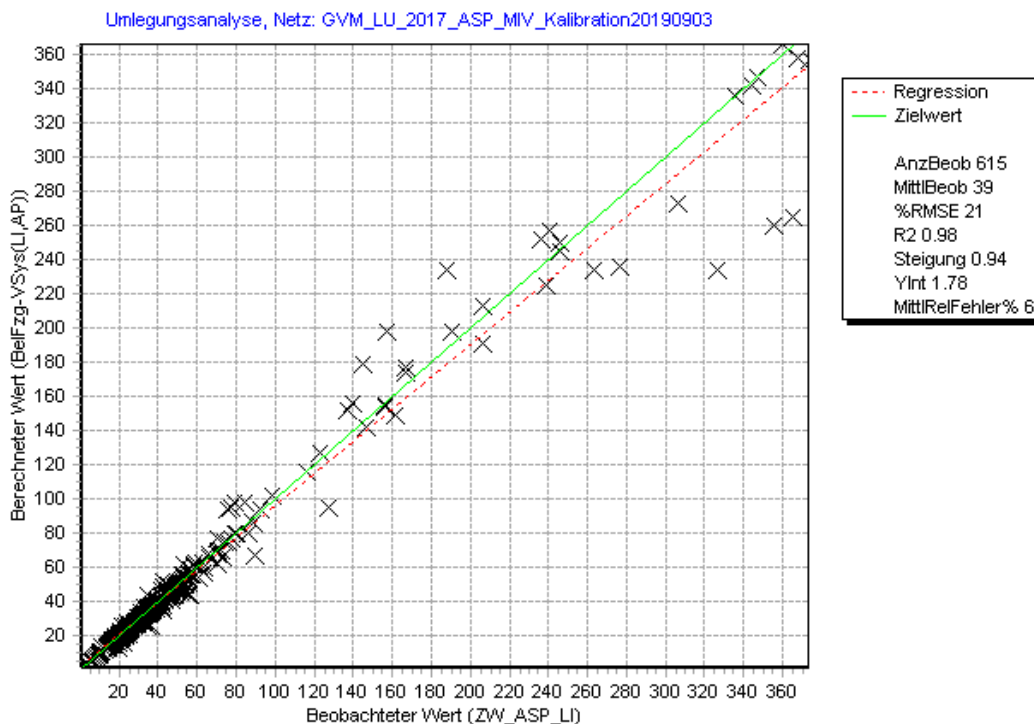


Abbildung 46: Vergleich der Streckenbelastungen (ASP) Modell vs. Zählung – Lastwagen (nach Kalibration)

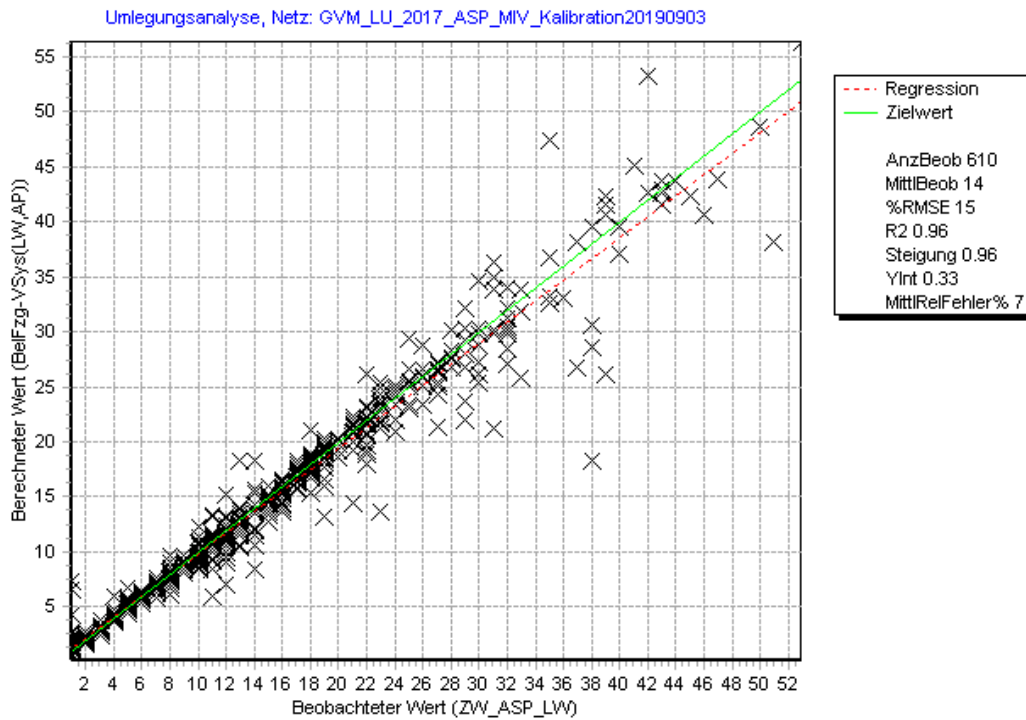


Abbildung 47: Vergleich der Streckenbelastungen (ASP) Modell vs. Zählung – Last- und Sattelzüge (nach Kalibration)

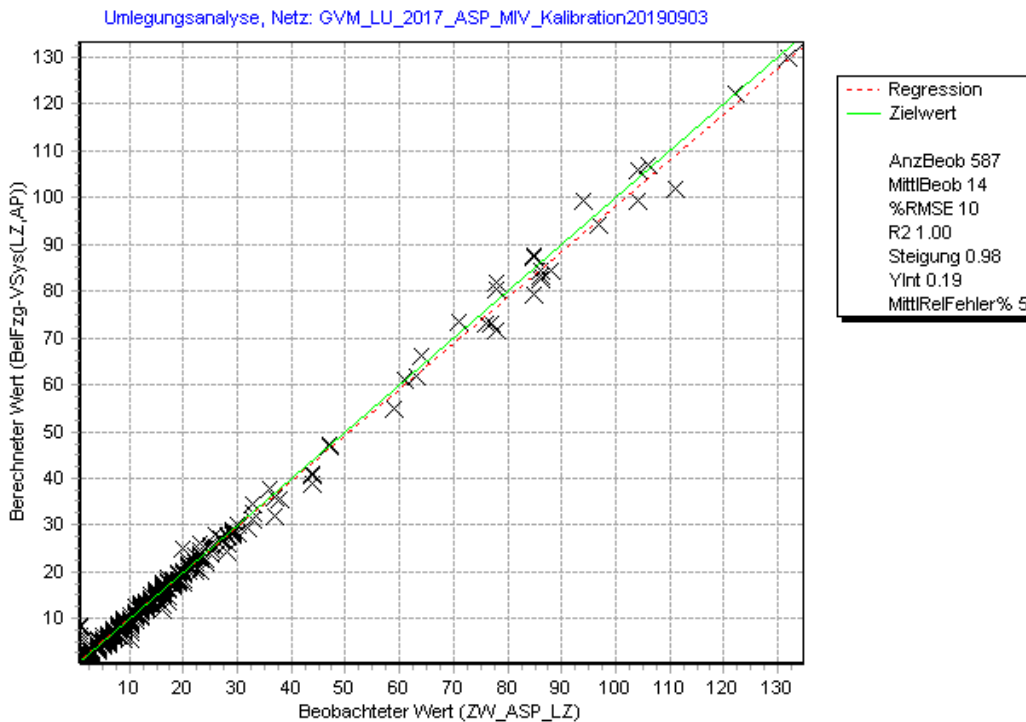


Abbildung 48 Vergleich der Streckenbelastungen (ASP) Modell vs. Zählung – MIV (nach Kalibration)

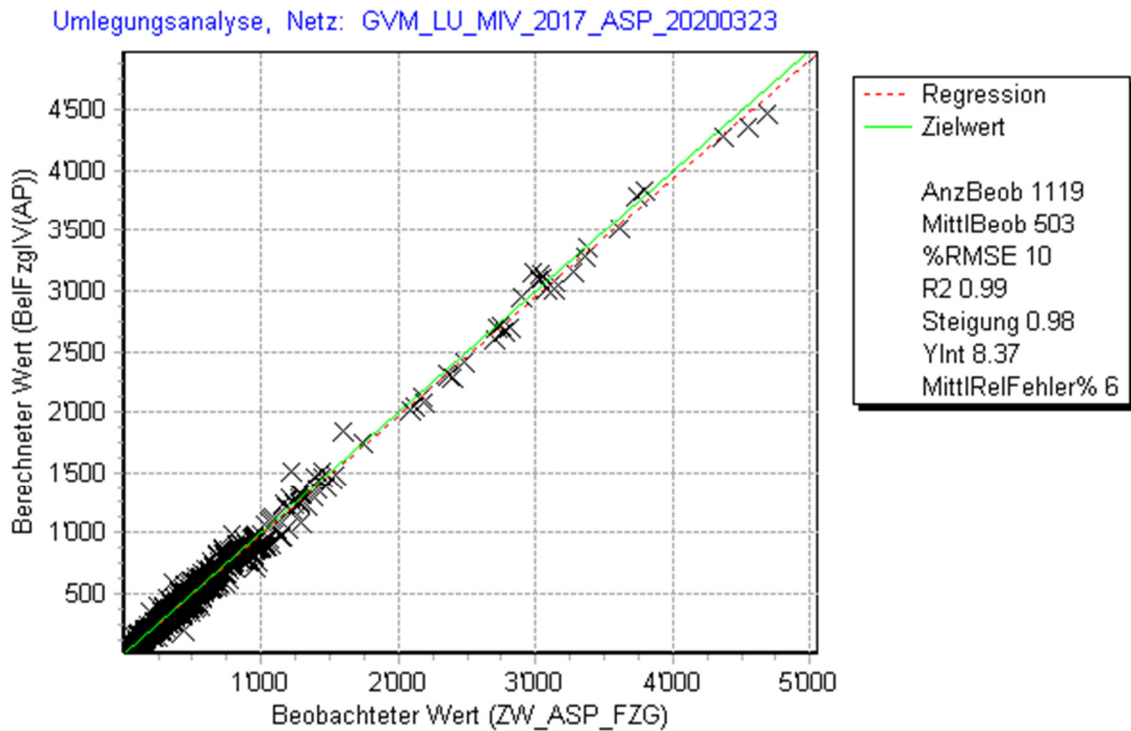
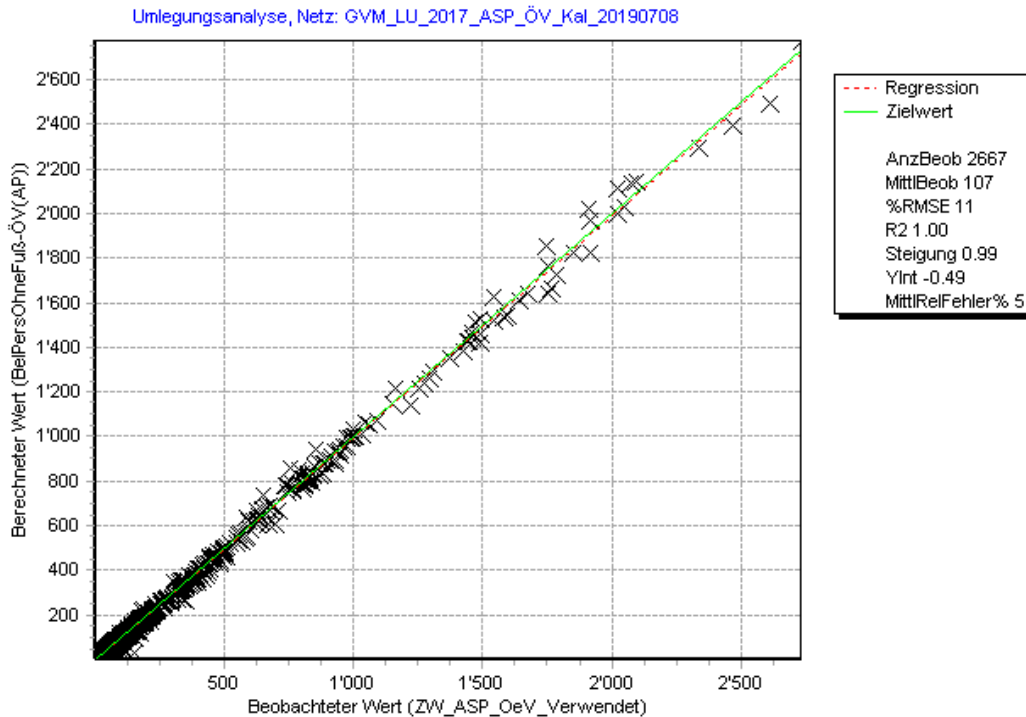


Abbildung 49: Vergleich der Streckenbelastungen (ASP) Modell vs. Zählung – ÖV (nach Kalibration)



9.6 Kalibration des DTV-Modells

Dieser Abschnitt zeigt analog zum DWV-Modell die Ergebnisse der Kalibration des DTV-Modells.

9.6.1 Ergebnisse Netzbelastungen

Tabelle 32: Vergleich der kalibrierten Streckenbelastungen mit den Querschnittszählungen (DTV)

Nachfragesegment	Anzahl Zählwerte	Mittlerer Zählwert	Mittlere rel. Differenz [%]	R2
PW	618	5'290	4.3	1.00
Lieferwagen	617	428	5.0	0.99
Lastwagen	617	180	3.7	1.00
Last- und Sattelzüge	616	157	4.1	1.00
MIV total	1'120	5'267	4.4	1.00
ÖV	2'741	927	5.1	1.00

Abbildung 50: Vergleich der Streckenbelastungen (DTV) Modell vs. Zählung – PW (nach Kalibration)

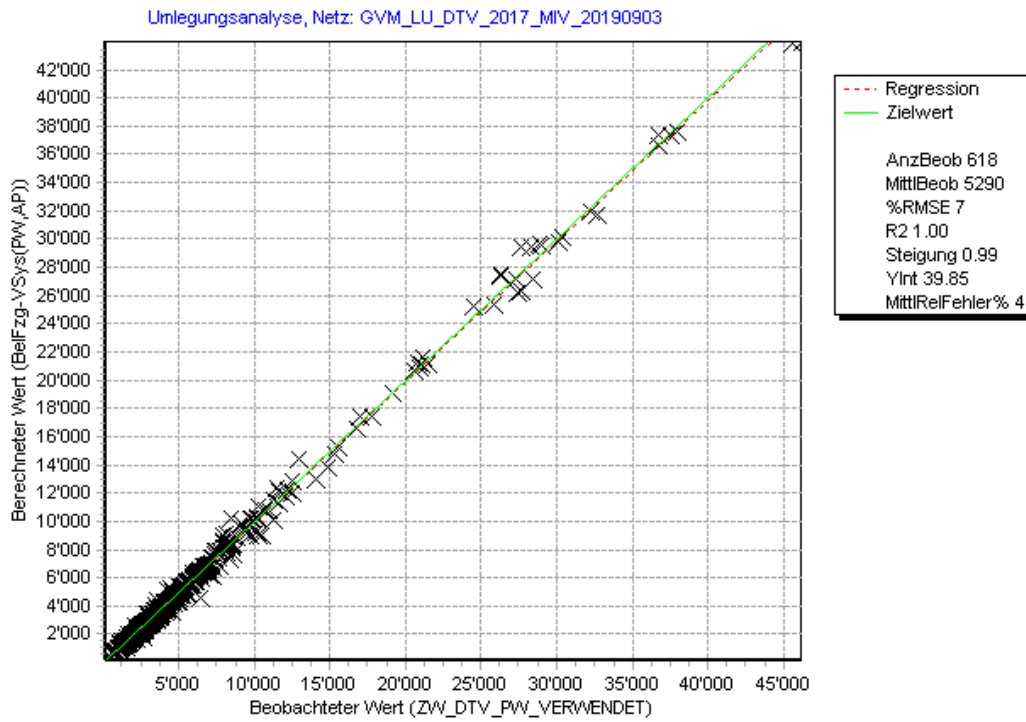


Abbildung 51: Vergleich der Streckenbelastungen (DTV) Modell vs. Zählung – Lieferwagen (nach Kalibration)

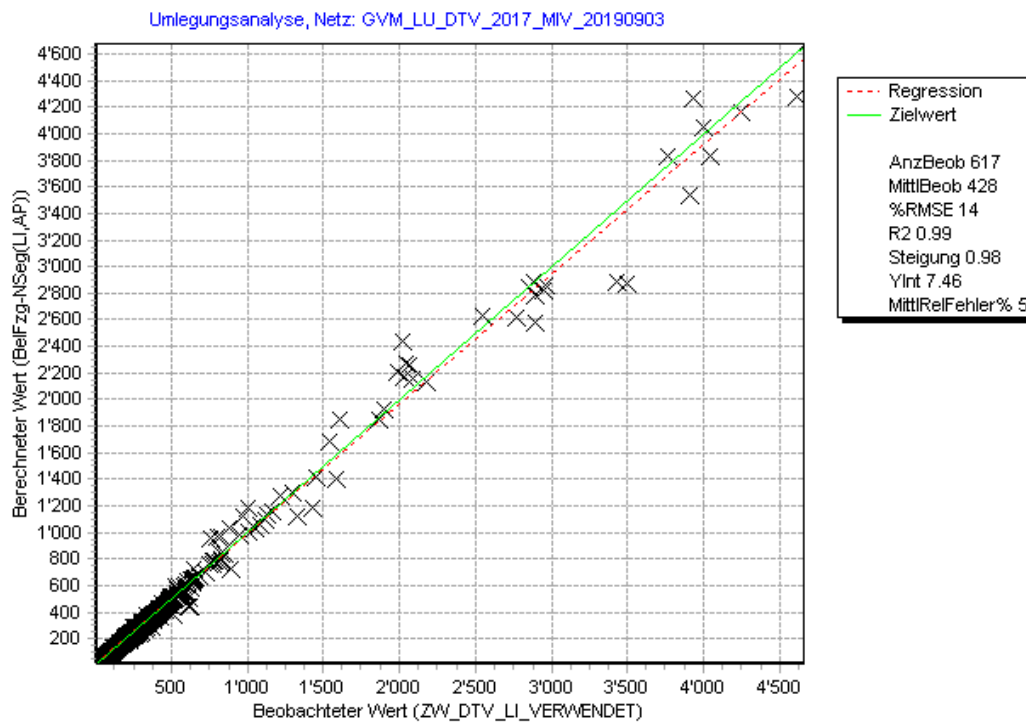


Abbildung 52: Vergleich der Streckenbelastungen (DTV) Modell vs. Zählung – Lastwagen (nach Kalibration)

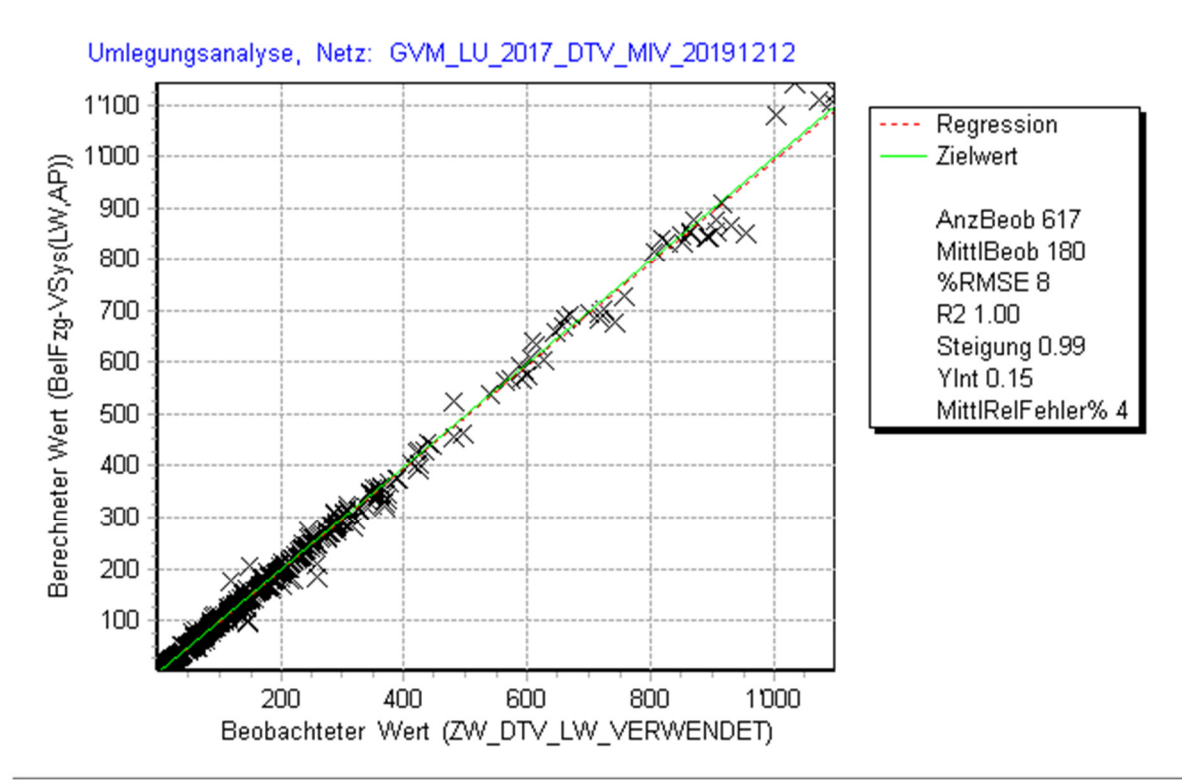


Abbildung 53: Vergleich der Streckenbelastungen (DTV) Modell vs. Zählung – Last- und Sattelzüge (nach Kalibration)

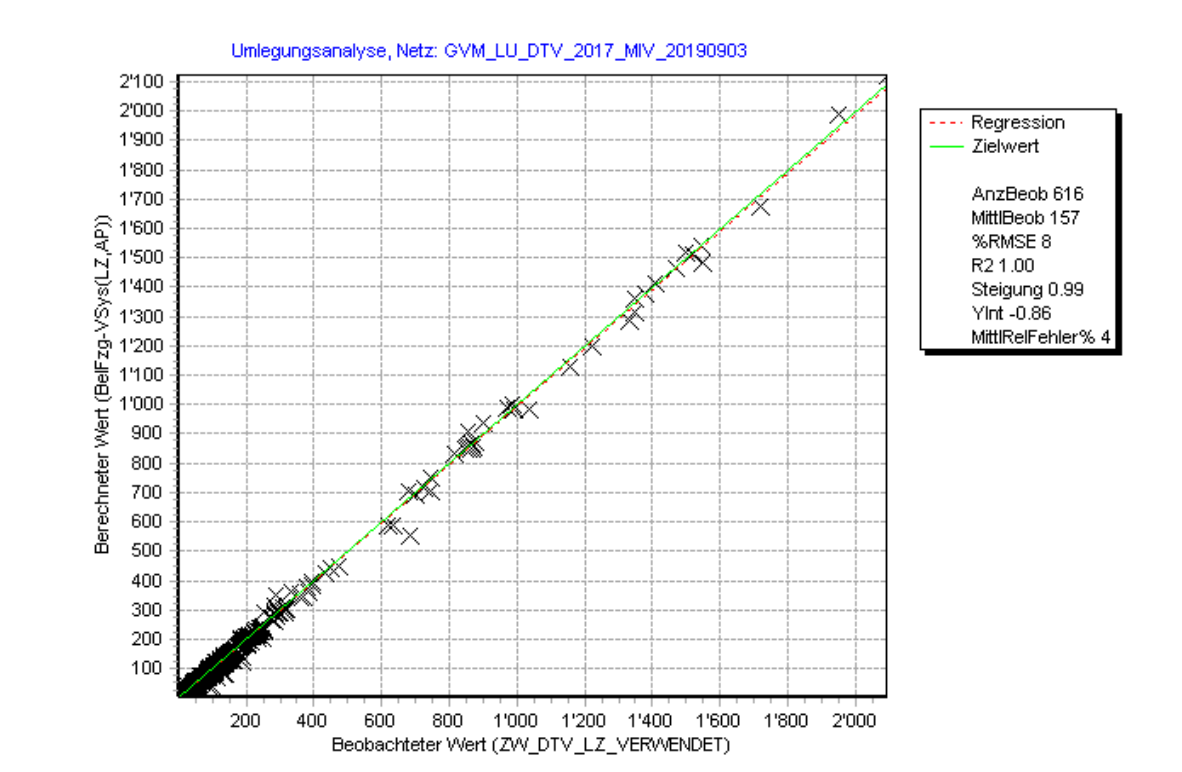


Abbildung 54: Vergleich der Streckenbelastungen (DTV) Modell vs. Zählung – MIV (nach Kalibration)

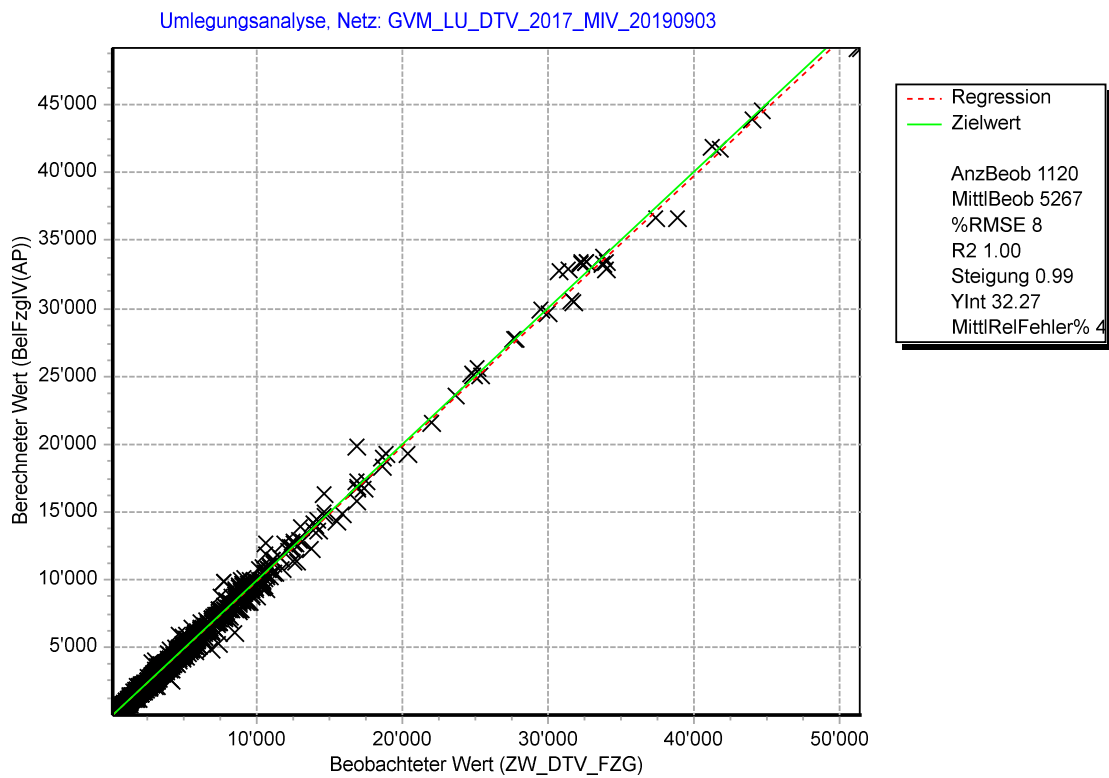
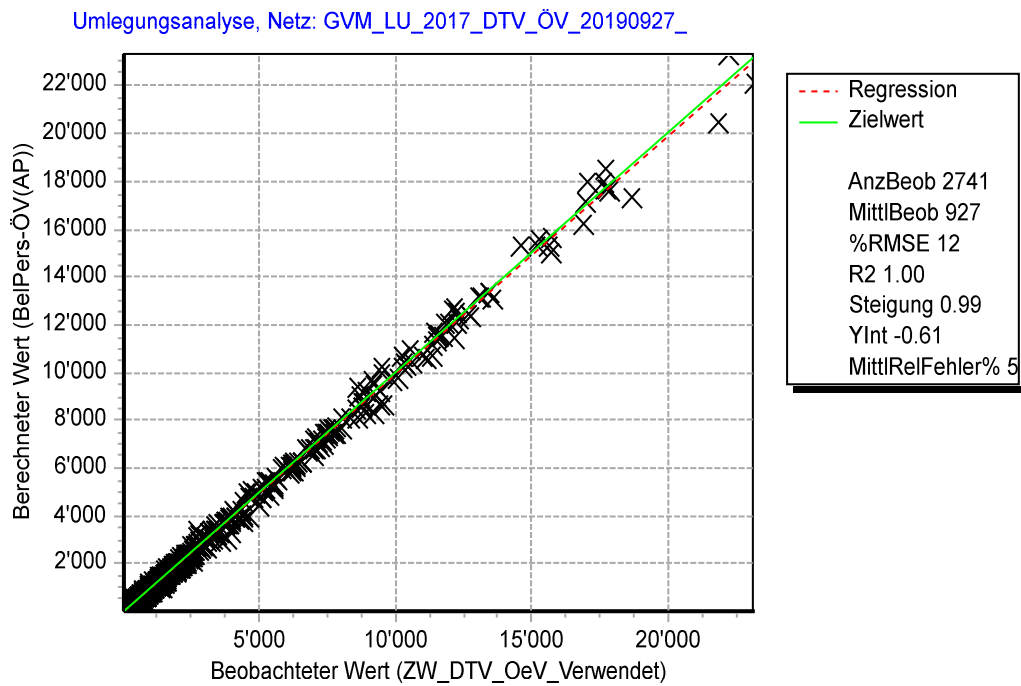


Abbildung 55: Vergleich der Streckenbelastungen (DTV) Modell vs. Zählung – ÖV (nach Kalibration)



10 Prognosezustand 2040

Im Rahmen der kantonalen Verkehrsplanung müssen verkehrliche Massnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht und bewertet werden. Für die Wirkungsabschätzung wird ein Bezugsszenario erstellt, der Referenzfall 2040.

Der Referenzfall berücksichtigt folgende Veränderungen gegenüber dem Ist-Zustand:

- Strukturdaten: Veränderungen in der Bevölkerungs- und Siedlungsstruktur
- Verkehrsangebot: Massnahmen im Verkehrsangebot, die mit hoher Wahrscheinlichkeit bis zum Prognosezeitpunkt umgesetzt sein werden.

Die Verkehrsprognose wird aus den jeweiligen Strukturdaten und Angebotsveränderungen zusammengestellt und die Verkehrsnachfrage neu berechnet. Die eingeflossenen Daten und die Umsetzung sowie Ergebnisse der Prognoserechnung werden in den folgenden Kapiteln dokumentiert.

Bei der Definition des Verkehrsangebots 2040 im MIV und ÖV wird grundsätzlich von einem sogenannten Referenzszenario ausgegangen, welches nur die aus heutiger Sicht gesicherten Projekte enthält. Dies ist für die Zweckmässigkeitsbeurteilung von weiteren Projekten vorteilhaft, da sonst die zu prüfenden Projekte schon in der Prognose enthalten sind, oder geplante Projekte in der Zwischenzeit zurückgestellt wurden.

Da der Referenzzustand beide Grossprojekte, den Durchgangsbahnhof und den Bypass Luzern enthält, wurden für den Prognosezustand des GVM Luzern zwei weitere Szenarien erstellt, um den Effekt der Grossprojekte auf die Nachfrage unabhängig voneinander darstellen zu können. Folgende Szenarien wurden erstellt:

- Prognoseszenario mit Bypass (aber ohne Durchgangsbahnhof Luzern)
- Prognosezustand mit Bypass und mit Durchgangsbahnhof Luzern = Referenzzustand
- Prognosezustand mit Durchgangsbahnhof Luzern (aber ohne Bypass Luzern)

10.1 Strukturdaten

Der Prognosezustand 2040 beinhaltet die gleichen Attribute wie die Abbildung des Ist-Zustandes (2017), wobei zwischen Bevölkerungsdaten am Wohnort und Strukturdaten am Zielort unterschieden wird.

Das Luzerner Bauzonenanalyse-Tool (LUBAT) wurde von der Dienststelle Raum und Wirtschaft des Kantons Luzern (rawi) selbstständig entwickelt und dient einer datenbasierten, automatischen Bauzonenanalyse zur Erfassung der Einwohnerkapazitäten der Gemeinden im Kanton Luzern. Die Einwohnerkapazitäten werden im LUBAT differenziert aufgrund des rechtskräftigen Zonenplans jeder Gemeinde geschätzt. Es werden insbesondere die unbebauten Bauzonen und das Verdichtungspotential unter Berücksichtigung der Einwohnerausdünnung ausgewiesen.

10.1.1 Rahmenbedingungen gemäss Kantonalen Richtplänen

Im kantonalen Richtplan, teilrevidiert 2015, legt der Kanton Luzern die Entwicklungsmöglichkeiten der Gemeinden fest. Darin wurden acht verschiedene Gemeindetypen definiert:

- Z1 kantonales Hauptzentrum
- Z2 kantonales Nebenzentrum
- Z3 urbane Gemeinde an Zentrum

- Z4 Zentrum in der Landschaft
- A Gemeinde auf der Hauptentwicklungsachse
- L1 Stützpunktgemeinde in der Landschaft
- L2 Nebenachsgemeinde in der Landschaft
- L3 Ländliche Gemeinde

Durch diese Differenzierung werden unterschiedliche Wachstumswerte festgelegt. Für die Gemeinden Z1 bis Z4, A und L1 wird das aus der Bauzonenkapazität gemäss der LUBAT-Berechnung gegebene Wachstum angenommen. Für die Gemeinden in den Kategorien L1, L2 und L3 wird ein maximales Wachstum von 0.5 % pro Jahr für Entwicklungen durch unbebaute Grundstücke sowie weiteren 0.5 % pro Jahr für Entwicklungen infolge von Verdichtungen vorgesehen. Diese Annahme berücksichtigt die Vorgabe des kantonalen Richtplanes, überdimensionierte Bauzonen zu reduzieren.

In den Kantonen Obwalden und Nidwalden sind die Entwicklungsszenarien gemeindescharf vorhanden. Der Kanton Obwalden weist einen erwarteten Bedarf an Einwohnern pro Gemeinde aus, der Kanton Nidwalden eine Bevölkerungsentwicklung in Prozent.

10.1.2 Methodik

Bei der Herleitung der Siedlungsprognose wurde ein „Bottom-Up“ Vorgehensansatz gewählt. Dabei wurde das LUBAT als Basis für die Berechnung der Strukturdaten 2040 verwendet. Die Entwicklungskapazitäten aufgrund der rechtskräftigen Zonenpläne dienen demnach als Grundlage für die Verteilung der Bevölkerungsentwicklung. Die Grössenordnung der Entwicklung basiert auf dem mittleren Szenario der Bevölkerungsprognose von LUSTAT. Die Entwicklungspotentiale gemäss den Zonenplänen wurden zudem mit den strategischen Zielen des kantonalen Richtplans, teilrevidiert 2015, abgestimmt.

Mit diesem Vorgehen wird sichergestellt, dass die Prognosen basierend auf den aktuellen Grundlagen erstellt werden und eine Aktualisierung in Zukunft mit geringerem Aufwand vollzogen werden kann.

Die folgenden Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- In einem ersten Schritt wurden die Kapazitäten gemäss Luzerner Bauzonen-Analyse-Tool (LUBAT) erhoben (unbebaute Grundstücke, Verdichtungspotentiale). Zusätzlich wurden wichtige Projekte erfasst
- Berechnung des Vollausbaus und Gegenüberstellung mit den Bevölkerungs- und Beschäftigtenprognosen
- Reduktion des Vollausbaus aufgrund diverser Faktoren, inkl. Abstimmung mit den strategischen Zielen des kantonalen Richtplans
- Weitere Gegenüberstellung mit den Bevölkerungs- und Beschäftigtenprognosen
- Integration einer Realisierungsverzögerung

Die Berechnungen wurden GIS-basiert durchgeführt. Durch die regelmässige Überprüfung der Annahmen und Zwischenergebnisse mit den Vorgaben aus der Bevölkerungsprognose konnte sichergestellt werden, dass die räumliche Verteilung realistisch ist und der Zielsetzung gemäss revidiertem kantonalem Richtplan 2015 entspricht.

Im Zuge der Aggregation auf die Verkehrszonen wurden die restlichen Attribute ebenfalls hochgerechnet. Im Weiteren wird auf das nachfolgende Kapitel verwiesen.

10.1.3 Veränderungen aufgrund Demographie und Mobilitätsverhalten

Bis ins Jahr 2040 werden sich das Mobilitätsverhalten sowie auch die Demographie der Schweizer Bevölkerung verändern.

Der Bund hat im Vorfeld zur Ausarbeitung des nationalen Personenverkehrsmodells eine Studie in Auftrag gegeben, welche die Veränderungen im Mobilitätsverhalten aufzeigen sollen (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2016: Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040). Für die Herleitung der Strukturdaten 2040 für das GVM LU wurden die in der Studie prognostizierten Werte übernommen.

Die nachfolgenden Kennwerte wurden in die Herleitung der Strukturdaten 2040 übernommen:

- Steigerung der Anteil Halbtax-Abo-Besitzer um +0.2 % pro Jahr
- Steigerung der Anteil Generalabonnements-Besitzer um +0.6 % pro Jahr
- Steigerung der Anteil Verbundsabo-Besitzer um +0.2 % pro Jahr
- Steigerung des Besitzes von Personenwagen um +0.2 % pro Jahr

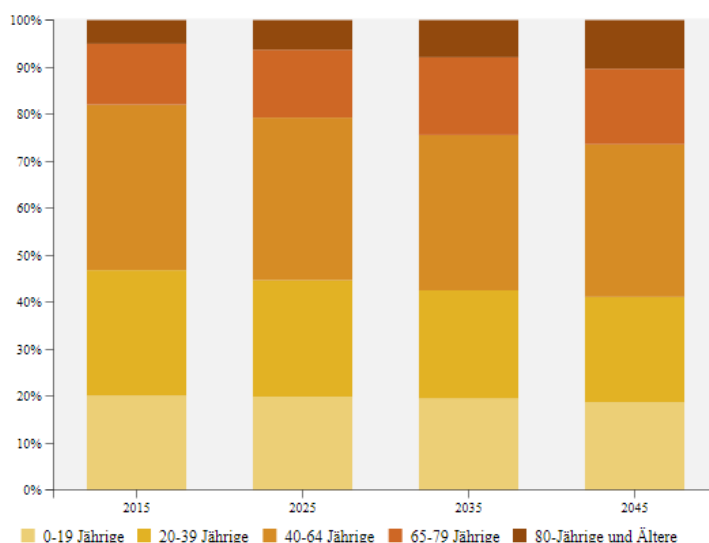
Die Anzahl Parkplätze wurden sowohl zur Herleitung der Strukturdaten 2017 als auch zur Herleitung der Strukturdaten 2040 mit einer Anteilsannahme von der Einwohnerzahl («private Parkplätze») resp. Beschäftigtenzahl («öffentliche Parkplätze») abgeleitet. Für die Prognose 2040 wurde dabei die Anzahl Parkplätze in der Stadt Luzern (ohne Stadtteil Littau) auf das heutige Mass plafoniert. In allen anderen Verkehrszonen steigt die Anzahl Parkplätze anteilmässig an. Zusätzlich wurden zukünftige Parkierungsanlagen erhoben, welche mit keiner Nutzung verbunden sind (z.B. öffentliche Parkhäuser). Ein allfälliges Museggparkhaus wurde nicht abgebildet.

Zusätzlich zu den Änderungen im Mobilitätsverhalten ändern sich die demographischen Grundlagen in den kommenden Jahren spürbar. Die Schweizer Bevölkerung altert, wodurch der Anteil an über 65-jährigen entsprechend steigt. Die Prognosen des Bundesamtes für Statistik (BfS) wurden dafür als Grundlage verwendet.

Abbildung 56: Entwicklung der ständigen Wohnbevölkerung nach Altersgruppen

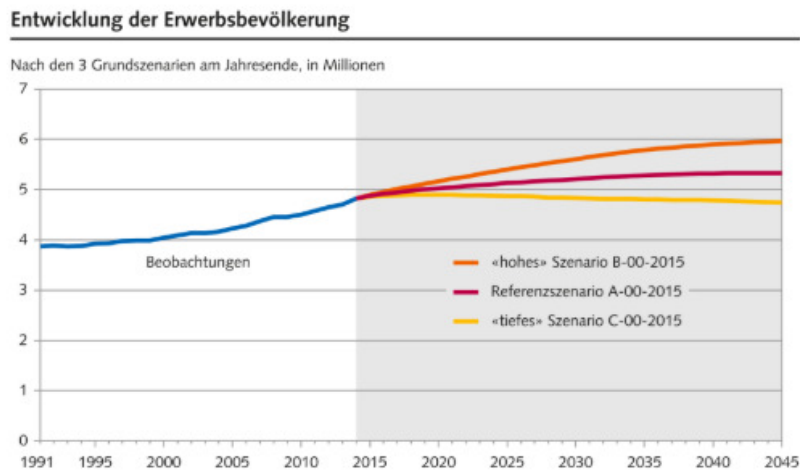
Entwicklung der ständigen Wohnbevölkerung nach Altersgruppen

Nach den 3 Grundscenarien, am Jahresende



Das BFS geht davon aus, dass sich die Entwicklung der Erwerbstätigen nicht linear zur Entwicklung der ständigen Wohnbevölkerung verhält. Dies bedeutet, dass die Anzahl Erwerbstätige weniger stark steigt als die Wohnbevölkerung. Unter anderem ist dies mit der Alterung der Gesellschaft begründet. Die Prognosewerte des Referenzszenarios wurden entsprechend in die Berechnung der Siedlungsdaten 2040 übernommen.

Abbildung 57: Entwicklung der Erwerbsbevölkerung



10.1.4 Datenstruktur

Kanton Luzern

Die Strukturdaten und deren Entwicklung bis 2040 wurden für den Kanton Luzern auf drei verschiedene Arten hergeleitet.

Die Dienststelle rawi des Kantons Luzern verfügt über einen Projektdatensatz, welcher im Rahmen der Aktualisierung des kantonalen Verkehrsmodells im Jahr 2017 erstellt wurde (vgl. Planteam S AG, GVM LU: Siedlungsdaten 2015, 2030, 2040; Schlussbericht). Dieser Datensatz wurde mit zusätzlichen Projekten, die in der Zwischenzeit neu erhoben wurden, ergänzt. Im Projektdatensatz sind nebst der Anzahl Einwohner und Beschäftigte (nach NOGA-Klassen) auch weitere Merkmale wie Parkplätze, Geschossflächen oder Fahrtenkontingente abgebildet.

Ein weiterer Entwicklungswert konnte mit Hilfe des Luzerner Bauzonenanalysetools LUBAT erhoben werden. Das LUBAT sieht für jede Zone jeder Gemeinde, sogenannter Zonenschilder, Verdichtungswerte in bestehenden, überbauten Gebieten vor. Für Gebiete, in denen keine Projekte gemäss oben beschriebenen Projektdatensatz vorhanden sind, konnte dieser Wert übernommen werden. In Gebieten mit Projekten, insbesondere in der Agglomeration Luzern sowie in Sursee, wurde dieser Wert gegenübergestellt mit dem Projektdatensatz und bei Bedarf (falls Entwicklungen doppelt eingeflossen wären) reduziert.

Zusätzlich zu den Verdichtungswerten sind im LUBAT die un bebauten Parzellen aufgeführt. Für die Einwohner sind dabei sehr detaillierte Annahmen vorhanden, welche übernommen werden konnten. Für die Herleitung der Beschäftigten wurden die Arbeitszonen und Mischzonen betrachtet und jeweils ein Wert Beschäftigte pro Hektare je nach Dichte und Art der Zone angenommen. Da die Erarbeitung der Strukturdaten 2040 bis Mitte 2019 dauerte, konnten nicht alle Inhalte der kantonalen Rückzonungsstrategie übernommen werden. Gemeinden mit zu grossen Baulandkapazitäten wurden aber berücksichtigt und deren Kapazitäten entsprechend reduziert.

Werden die oben beschriebenen Werte hochgerechnet, so wird die gesamte Kapazität aller Zonenpläne im Kanton Luzern inklusive zusätzliche grössere Entwicklungs- und Umnutzungsvorhaben abgebildet. Diese Kapazität ist höher als die massgebenden Bevölkerungsszenarien von LUSTAT.

Es ist jedoch nicht absehbar, an welchen Lagen keine Entwicklungen stattfinden. Daher wurden für die unbebauten Parzellen (LUBAT unbebaut) Reduktionsfaktoren angewendet, wodurch die Kapazitäten der Zonenpläne und die Lage dieser Reserven nicht negiert wurden, jedoch eine Berücksichtigung der Vorgaben zum allgemeinen Mengengerüsts (vgl. 10.1.5) stattfinden konnte.

Kantone Obwalden und Nidwalden

Massgebender Wert für die Anzahl Beschäftigten- und Einwohnerzahlen des Jahres 2040 ist in den Kantonen Obwalden und Nidwalden der jeweilige Entwicklungswert der Kantonalen Richtplänen, wobei beim Kanton Obwalden der Stand Genehmigung Kantonsrat (12.09.2020) zur Anwendung kam. Beide kantonalen Richtpläne verfügen über Entwicklungsszenarien, welche auf die Gemeinden differenziert sind. Diese konnten übernommen werden.

Für die Verteilung auf die einzelnen Verkehrszonen innerhalb einer Gemeinde wurde qualitativ überprüft, an welchen Lagen Entwicklungen aus raumplanerischen und planungsrechtlichen Überlegungen möglich sind. Die Verteilung der gemeindespezifischen Entwicklungszahlen erfolgte entsprechend dieser Überprüfungen.

Weitere Gebiete

Ausserhalb der Kantone LU, OW und NW liegen als Einflusszonen diverse Gebiete der Kantone Uri, Schwyz, Zug und Aargau innerhalb des Modellperimeters. Die Zonenflächen entsprechen dabei denjenigen des NPVM. Da zum Zeitpunkt der Erarbeitung der Strukturdaten 2040 noch keine Prognosewerte des NPVM vorlagen, wurden die Entwicklungen innerhalb dieser Verkehrszonen aufgrund der Kantonalen Richtplanungen hergeleitet.

Alle kantonalen Richtpläne verfügen über Aussagen zur Verteilung der Bevölkerungsentwicklung, entweder gemeindespezifisch oder aufgrund einer Kategorisierung der Gemeinden. Diese Angaben wurden für die einzelnen Verkehrszonen entsprechend übernommen.

Die Beschäftigtenentwicklung wurde ebenfalls von den kantonalen Richtplänen auf die Gemeinden gerechnet. In denjenigen Kantonen, in welchen der Richtplan keine Aussage über eine Beschäftigtenentwicklung bis 2040 gemacht wird, wurde das Entwicklungsszenario der Bevölkerung sinngemäss für die Beschäftigtenentwicklung übernommen.

10.1.5 Mengengerüst

Die Anzahl Einwohner und Beschäftigte 2040 im Kanton Luzern setzt sich aus der Summe der folgenden Werte zusammen:

- Einwohner / Beschäftigte 2017
- Einwohner / Beschäftigte aus dem Projektdatensatz
 - Einwohner 50.9 % des Entwicklungspotenzials 2017-2040
 - Beschäftigte: 54.5 % des Entwicklungspotenzials 2017-2040
- Einwohner / Beschäftigte aus den Verdichtungspotenzialen nach LUBAT
 - Einwohner: 21.4 % des Entwicklungspotenzials 2017-2040
 - Beschäftigte: 10.1 % des Entwicklungspotenzials 2017-2040
- Einwohner / Beschäftigte aus den unbebauten Grundstücken

- Einwohner: 27.7 % des Entwicklungspotenzials 2017-2040
- Beschäftigte: 35.4 % des Entwicklungspotenzials 2017-2040

Daraus ist zu erkennen, dass bei den Einwohnern ca. 3/4 aller Entwicklungen im Kanton Luzern in bestehenden Siedlungsräumen (Siedlungsentwicklung nach innen) stattfinden soll, bei den Beschäftigten sind es ca. 2/3 der Entwicklungen.

In den Kantonen Obwalden und Nidwalden fand eine qualitative Verteilung der Einwohner- und Beschäftigtenwerte statt.

Im Kanton Luzern wurde ein Zielwert von 495'000 Einwohnern definiert. Dieser folgt dem aktuellen Trend, welcher etwas höher ist als das mittlere Szenario.

Tabelle 33: Mengengerüst Einwohner für die Kantone LU, OW, NW

Einwohner 2040	Zielwert	Erreichter Wert
Kanton Luzern	495'000	497'958
Kanton Obwalden	42'600	42'540
Kanton Nidwalden	46'500	46'377

Tabelle 34: Mengengerüst Beschäftigte für die Kantone LU, OW, NW

Beschäftigte 2040	Zielwert	Erreichter Wert
Kanton Luzern	290'000	289'301
Kanton Obwalden	18'900 (VZÄ)	18'647 (VZÄ)
Kanton Nidwalden	Ca. 26'000	26'200

10.1.6 Resultate Prognosezustand 2040

Aufbauend auf den Einwohnern- und Beschäftigtenwerten für das Jahr 2040 wurden die restlichen für die Modellierung benötigten Attribute berechnet. Dabei wurden die in Kapitel 10.1.3 beschriebenen Veränderungen berücksichtigt. Für Attribute, bei denen keine Daten zu allfälligen Veränderungen vorhanden sind (z.B. Besucher pro Beschäftigte), wurde auf eine Veränderung verzichtet und die Annahmen aus der Herleitung für den Ist-Zustand übernommen. Als Resultat der Berechnungen des Prognosezustandes wurde für die weitere Bearbeitung des GVM LU dem Bearbeitungsteam ein Datensatz mit Werten zu den folgenden, vorgängig beschriebenen Strukturdaten abgegeben (die Resultate sind pro Verkehrszone im entsprechenden Datensatz ersichtlich und werden im Bericht nicht weiter aufgeführt):

Tabelle 35: Strukturdaten 2040 GVM LU

Kategorie	Strukturgrößen
Einwohner	Einwohner Total Erwerbstätige Einwohner 0-17-jährig Einwohner 18-24-jährig Einwohner 25-44-jährig Einwohner 45-64-jährig Einwohner 65-74-jährig Einwohner älter als 75
Auszubildende am Wohnstandort	Schüler am Wohnort Einwohner 6-24-jährig Einwohner 18-24-jährig
Mobilität am Wohnort	Personenwagen verfügbar Halbtax GA Verbundsabo PW-Besitz Firmenwagen
Beschäftigte	Beschäftigte Total Beschäftigte Vollzeitäquivalente
Verkauf	Verkaufsflächen total in m2 Verkaufsflächen kurzfristiger Bedarf in m2 Verkaufsflächen langfristiger Bedarf in m2 Weitere nur für die Einflusszonen (aus dem NPVM übernommen) Besucher Verkauf Besucher Verkauf kurzfristig Besucher Verkauf langfristig Besucher Einkaufszentren
Besucher Freizeit pro Tag	Besucher Naturparks Besucher Orchester / Theater Besucher Kino Besucher Bibliothek Besucher Museen und historische Stätten Besucher Sport Besucher Restaurant Besucher Bars, Disco Besucher Hotel Besucher Spital Besucher Seilbahnen Besucher Kultur Total Besucher Freizeit Total
Auszubildende am Schulstandort	Schüler Primar an Schulstandort Schüler Sek an Schulstandort Schüler Total an Schulstandort Lehrlinge an Schulstandort Studenten an Unistandort
Parkierung	öffentliche Parkplätze private Parkplätze Parkplätze total

10.2 MIV-Netz

Für das MIV-Netz wurden gemeinsam mit dem Kanton Luzern die sehr wahrscheinlichen im Jahr 2040 umgesetzten Strassenprojekte definiert. In der Versionsdatei wurde für Prognose-Strecken ein benutzerdefiniertes Attribut mit dem Namen „Prognosemassnahme“ vorgesehen. In der nachfolgenden Tabelle 36 sind die Massnahmen aufgeführt.

Tabelle 36: Prognosemassnahmen GVM LU 2040

Kanton	Ort	Massnahme
Luzern	Luzern	A2 / A14 Bypass Luzern
Luzern	Beromünster	Umfahrung Nord
Luzern	Emmen	7/8 Anschluss Emmen Nord
Luzern	Littau	Umfahrung, Erweiterung Cheerstrasse
Luzern	Schötz	Umfahrung Ost
Obwalden	Alpnach	Vollanschluss Alpnach
Obwalden	Giswil-Lungern	Tunnel Kaiserstuhl
Schwyz	Küssnacht	Ausbau Zugerstrasse und Südumfahrung (1. Abschnitt)
Schwyz	Sisikon	Umfahrung (Axenstrasse), Morschacher- und Sisikontunnel

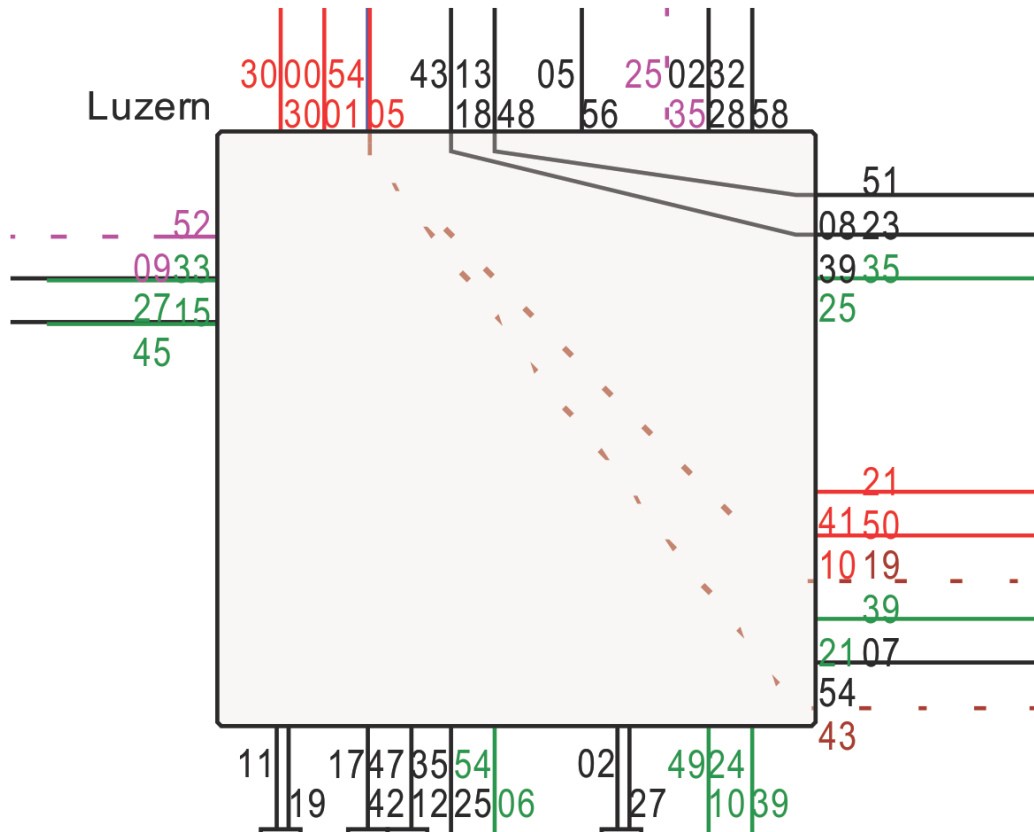
10.3 ÖV-Netz

Im ÖV-Netz wurden die Fahrplanzustände 2040 ohne und mit Durchgangsbahnhof Luzern (DBL) abgebildet. Die Bahnfahrplandaten wurden für die Variante ohne DBL von den SBB mit dem Namen «STEP AS 35 Variante ohne Plateaudrehung (GK12)» bezogen. Diese wurden für das Verkehrsmodell Luzern aufbereitet und am Netz geroutet.

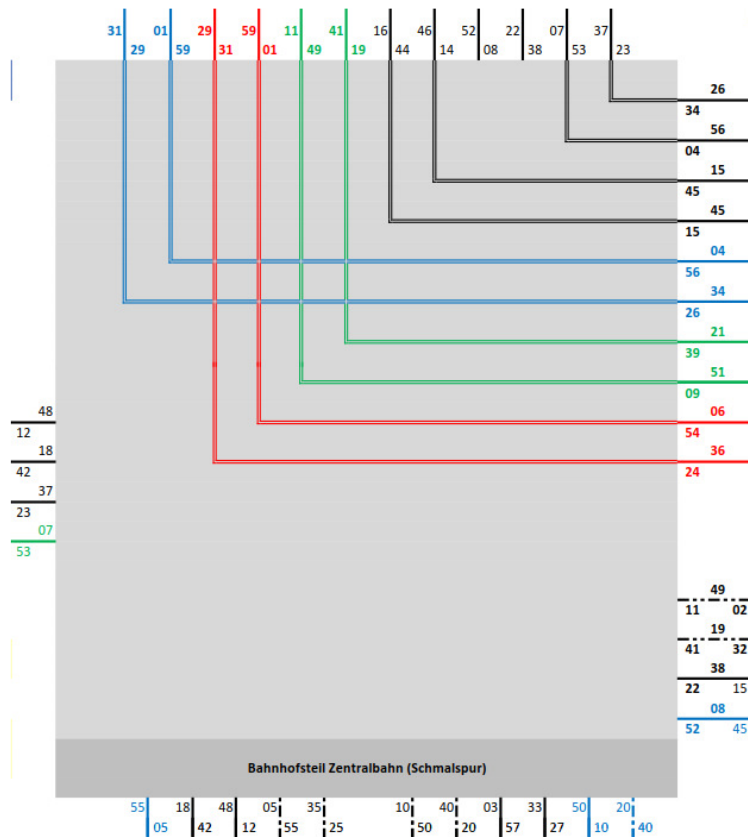
Für die Variante mit DBL wurde der STEP AS 35 Fahrplan zum Fahrplanentwurf Variante 3 (mit Neubau Zimmerberg II) laut der Nutzenstudie «Tiefbahnhof Luzern» von Rapp Trans (2015), im Auftrag des Kantons Luzern und des Verkehrsverbunds Luzern erstellt, abgeändert. Die Abbildung 58 zeigt schematisch die Züge am Knoten Luzern ohne und mit DBL.

Abbildung 58: ÖV Prognosefahrplan 2040: Netzgrafik Knoten Luzern ohne und mit DBL

Fahrplan 2040 ohne DBL: STEP AS 35 (Quelle: SBB)



Fahrplan 2040 mit DBL (Quelle: Rapp Trans, 2015)



In Abbildung 59 und Abbildung 60 sind die Anzahl Kurse am Bahnnetz der beiden Varianten dargestellt.

Abbildung 59: ÖV Prognosefahrplan 2040: Anzahl Kurse Bahn ohne DBL

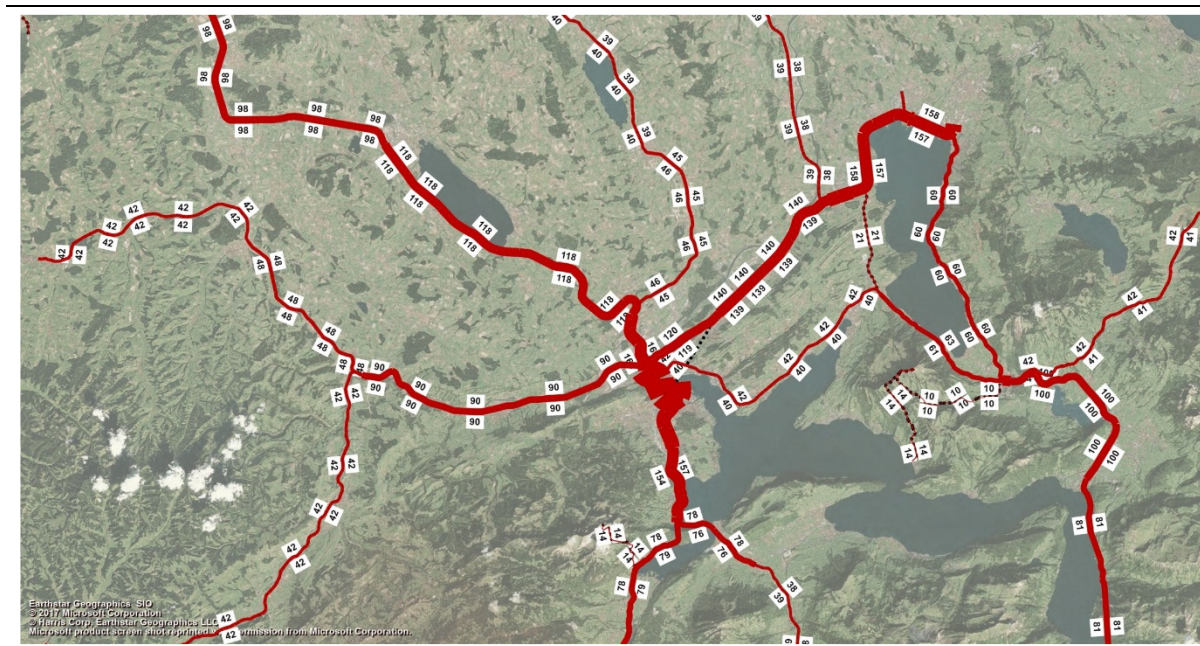
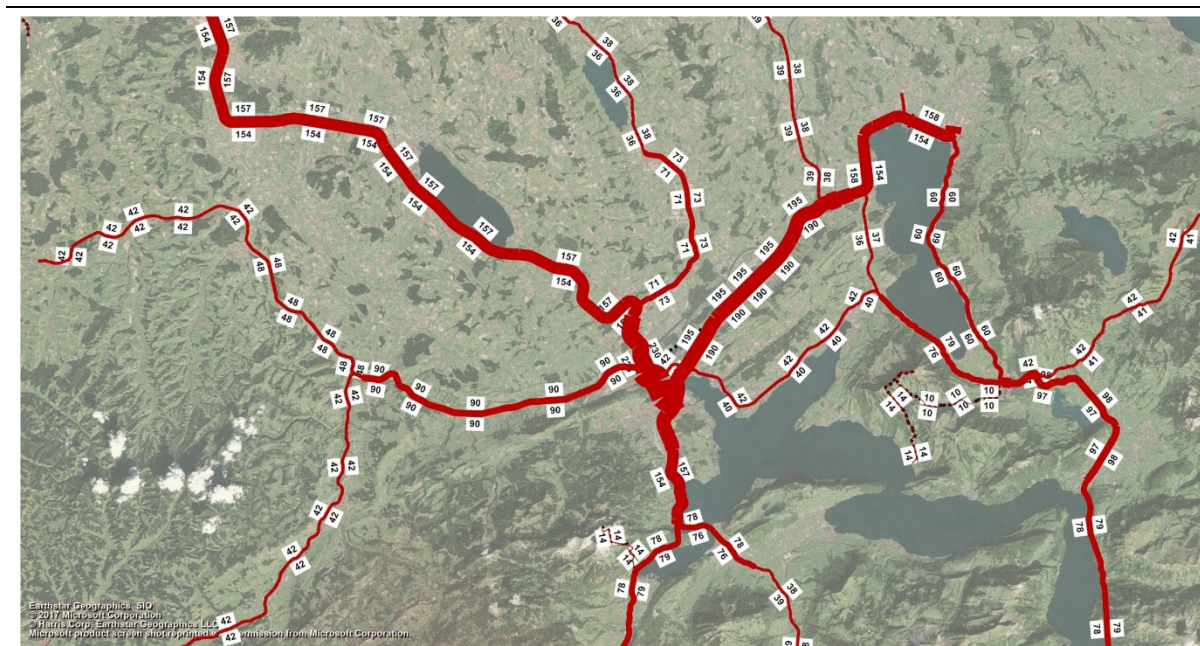


Abbildung 60: ÖV Prognosefahrplan 2040: Anzahl Kurse Bahn mit DBL



Im Bericht von RappTrans (2015) sind folgende Argumente bezüglich des Durchgangsbahnhofs Luzern im Vergleich zum bestehenden Kopfbahnhof angeführt:

- DBL ermöglicht eine deutliche Beschleunigung auf zahlreichen Relationen:
 - Fahrtzeitgewinne im engeren Sinn auf der Achse Luzern – Rotkreuz
 - Auf anderen Relationen sind häufigere und direktere Verbindungen möglich mit besseren Anschlüssen in den Knoten und die weniger komplexe Einfahrt in Luzern ermöglichte Kürzung von technischen Reserven.

- Die Stadt Luzern als Standort des DBL profitiert von direkt realisierbaren Fahrzeitgewinnen und vor allem von den zahlreichen Taktverdichtungen. Der auf den nationalen Nord-Süd- und West-Süd-Achsen verzeichnete Reisezeitgewinn von ca. 15 Minuten bleibt hingegen für den Standort Luzern aus, da dieser zu einem guten Teil durch die massive Verkürzung der Haltezeiten (Wegfall Wende- und Kürzung der Haltezeiten) geschuldet wird.
- Die internationalen Anschlüsse via Basel (TGV-Paris, ICE-Halbstundentakt) und Mailand (Gewinn einer Systemviertelstunde) werden verbessert.

In beiden Netzzuständen 2040 (ohne und mit DBL) ist das identische untergeordnete ÖV-Angebot hinterlegt, dies umfasst das Angebot aus 2017 mit folgenden Änderungen bzw. Erweiterungen:

- Agglo Luzern
 - AggloMobil due
 - AggloMobil tre
 - AggloMobil 4
- Buskonzept Sursee

10.4 Berechnung der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrageveränderungen (Prognose 2040) werden in zwei Schritten berechnet:

- Nachfragewachstum und -veränderungen aus soziodemographischen und wirtschaftlichen Veränderungen (angebotsunabhängige Nachfrageveränderungen);
- Verkehrsmittel-, Ziel- und Routenwahlveränderungen auf Grundlage von Angebotsveränderungen (angebotsabhängige Nachfrageveränderungen).

Aufgrund der soziodemographischen und siedlungsstrukturellen Veränderungen wird basierend auf dem Erzeugungsmodell des Basisjahrs (Ist-Zustand 2017) ein entsprechendes Modell für den Prognosezustand erstellt. Neben den prognostizierten Strukturdaten sind die spezifischen Mobilitätsraten wichtige Eingangsgrößen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich die Mobilitätsraten bis 2040 verändern werden.

Aus dem zukünftigen Verkehrsangebot und dem Erzeugungsmodell werden mit dem simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodell (EVA) die neuen fahrtzweckspezifischen Prognosematrizen erstellt. Ansatz, Segmentierung, Nutzenfunktion und Modellparameter werden aus dem Basisjahrsmodell übernommen. Die Berechnung wird auf die gleiche Weise wie im Ist-Zustand für die 27 Quelle-Ziel-Gruppen durchgeführt.

Die Erstellung der Gesamtnachfrage für das Prognosejahr 2040 wird in zwei Schritten durchgeführt:

- Binnenverkehr: Erstellung von Quelle-Ziel-Matrizen im Binnenverkehr 2040 (EVA) und Ableitung der Nachfrageveränderungen;
- Hochrechnung der Gesamtmatrix 2040 inklusive Aussenverkehr: Hochrechnung der Nachfrageveränderungen aus den ermittelten Nachfrageveränderungen 2040/2017 (EVA) und aus der kalibrierten Matrix 2017.

Wie bei der Erstellung der Quelle-Ziel-Matrizen für das Jahr 2017 kann auch die Matrix für das Jahr 2040 nicht in ihrer Gesamtheit auf einmal erstellt werden. Stattdessen müssen wiederum eigenständige Berechnungen für die Binnen- und Aussenverkehre durchgeführt werden.

Das Nachfragewachstum im Aussenverkehr wird aus dem Prognosemodell des NPVM (Verkehrsperspektiven Schweiz 2040) übernommen. Zusätzlich zu den aus dem NPVM berechneten Wachstumsraten der Aussenzonen wurde auch die Nachfragewirkung des Durchgangsbahnhofs Luzern (DBL) und des Zimmerbergtunnels durch die Anwendung des NPVM berechnet. Hier wurde der Zustand NPVM 2040 (ohne Zimmerberg und ohne DBL) durch zwei weitere Modellzustände ergänzt: mit Zimmerberg und mit DBL sowie mit Zimmerberg und ohne DBL. Anschliessend wurden mit dem Nachfragemodell des NPVM (VISEVA) die Nachfrageberechnungen durchgeführt und die Wirkung des Zimmerbergtunnels und des DBL differenziert abgeleitet. Die berechneten Nachfragewirkungen wurden auf die Aussenzonen des GVM Luzern übertragen und in die MIV- und ÖV-Matrizen integriert. Die Modellauswertungen zeigten, dass sich die Aussenverkehrsnachfrage im ÖV zwischen Rotkreuz und Luzern durch den Zimmerbergtunnel um ca. 9 % erhöht und durch den Durchgangsbahnhof Luzern zusätzlich um ca. 30 %. Damit ist die Wirkung des DBL auf die Verkehrsströme zwischen dem Grossraum Luzern und Zürich deutlich stärker als die Wirkung des Zimmerbergtunnels.

Aus den ermittelten Quelle-Ziel-Matrizen für das Jahr 2040 und 2017 werden zunächst die Veränderungen des Verkehrsaufkommens für jede Quelle-Ziel-Beziehung berechnet. Diese werden als Differenzmatrizen dargestellt. Grundlage für die Erstellung der Quelle-Ziel-Matrizen für das Jahr 2040 sind die auf die Querschnittszählungen kalibrierten Quelle-Ziel-Matrizen 2017 und die neu berechneten Differenzmatrizen zwischen dem Prognosejahr und 2017 (EVA). Aus der Summe der kalibrierten Quelle-Ziel-Matrizen 2017 und der Differenzmatrizen „Prognosejahr 2040 – 2017“ ergeben sich die neuen Quelle-Ziel-Matrizen 2040 (siehe auch Abbildung 61). Damit findet hier eine Hochrechnung der Differenzmatrix aus dem Nachfragemodell (EVA) 2040-2017 auf die kalibrierte Quell-Ziel-Matrix 2017.

Es besteht die Frage, ob die Änderungen zwischen der EVA- und der kalibrierten Visum-Matrix auf die Prognoseergebnisse als relative oder absolute Veränderung übertragen werden soll. Hier wurde entschieden, die Differenzmatrix aus der relativen und absoluten Veränderung als arithmetisches Mittel zu berechnen und auf die kalibrierte 2017-Matrix hochzurechnen. Bei einzelnen Zonen mit grösseren Siedlungsveränderungen (ESP) und geringem Verkehrsaufkommen im Ist-Zustand, wurde durch ein Plausibilisierungsfiter die eingesetzte Methode zusätzlich geprüft und nach Bedarf durch die absolute Veränderung ersetzt.

Für die Ableitung der Spitzenstundenmodelle stellen die Anteile der betrachteten Stunde am Tagesverkehr die entscheidende Grundlage dar. Hier werden die Anteile der einzelnen Quelle-Ziel-Gruppen bzw. Fahrtzwecke am Tagesverkehr aus dem Ist-Zustand übernommen. Damit ergeben sich Veränderungen der Tagesganglinien im Prognosejahr gegenüber dem Ist-Zustand nur aus der veränderten Fahrtzweckstruktur. Wie im Ist-Zustand beinhaltet auch im Prognosemodell jeder Modellzustand die fünf Nachfragesegmente Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen, Last-/Sattelzüge und ÖV-Passagiere. Die Verhaltensparameter für die Verkehrsnachfrageberechnungen (und die Umlegung) werden unverändert aus dem Zustand 2017 übernommen.

Bei den Erzeugungsraten wird für die einzelnen Fahrtzwecke ein Mittelweg zwischen den Perspektiven «2010/2030» und «2010/2040» gewählt. Die Änderungen im Vergleich zum Ist-Zustand 2017 sind in der Tabelle 37 ersichtlich. Im Durchschnitt erhöhen sich die Mobilitätsraten im Einkaufverkehr um 3% und im Freizeitverkehr um 9%.

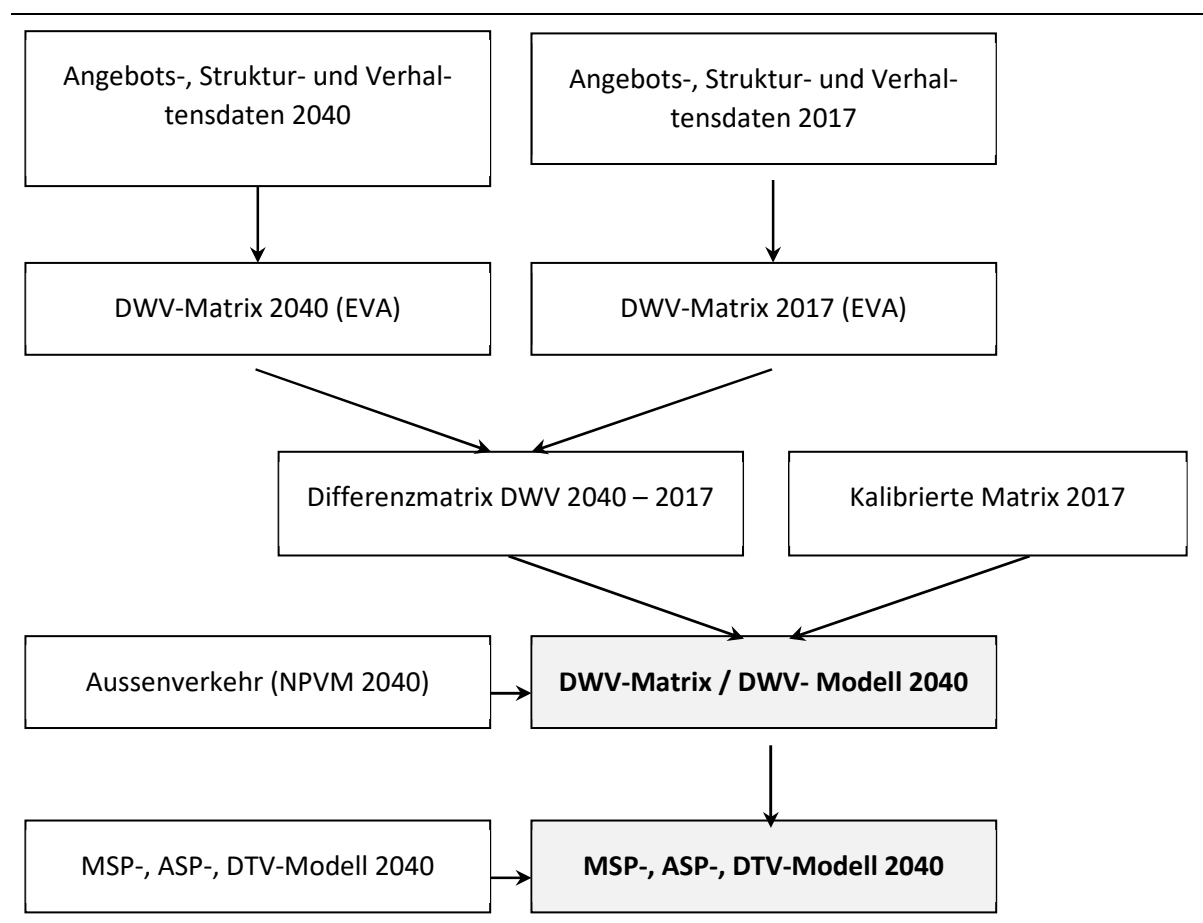
Tabelle 37: Veränderung der Erzeugungsraten 2017/2040

Fahrtzweck	Altersklasse	Veränderung Erzeugungsrates 2017/2040
Arbeit	alle Altersklassen	unverändert
Ausbildung	alle Altersklassen	unverändert
Einkauf	<25	2.4 %
	25-59	2.4 %
	60-80	7.2 %
	>80	3.6 %
Nutzfahrt	alle Altersklassen	8.8 %
Freizeit	<25	6.2 %
	25-59	6.2 %
	60-80	20.7 %
	>80	10.4 %

Die Wachstumsfaktoren im Strassengüterverkehr zwischen 2017 und 2040 werden leicht abgeändert aus dem NPVM übernommen. Die Matrizen im Strassengüterverkehr werden somit gegenüber 2017 um 22 % erhöht.

Die Besetzungsgrade für PW-Fahrten werden, analog zu Modellen anderer Kantone (da sich der Besetzungsgrad je nach Szenario unterschiedlich entwickelt), wie im Ist-Zustand belassen. Die Angebotskenngrößen für Velo- und Fussreisezeiten 2040 wurden unverändert aus dem Basiszustand 2017 übernommen, da keine Massnahmen für diese Modi implementiert wurden. Die Angebotskenngrößen für den MIV und ÖV werden aus dem Strassen- und ÖV-Netz 2040 ausgeschrieben. Die Reisekosten im ÖV werden mit 0.20 CHF/km und im MIV mit 0.16 CHF/km berechnet. Hier wurde durch die Rückkoppelung zwischen Nachfrageberechnung und Umlegung bzw. belastungsabhängiger Reisezeitmatrix im Strassenverkehr, ein Gesamtgleichgewicht erstellt. Die Rückkoppelung wurde wiederholt bis die Gleichgewichtsbedingung (Anzahl Fahrten pro Verkehrsmittel sowie PW-Reisezeitmatrix, Iteration n minus Iteration n-1) erfüllt wurde.

Abbildung 61: Vorgehen bei der Erstellung der Prognosemodelle 2040



10.5 Ergebnisse

10.5.1 Binnenströme

Tabelle 38 zeigt die Entwicklung der Gesamtverkehrsnachfrage (Verkehrsaufkommen) innerhalb des Modellperimeters von 2017 bis 2040. Die Gesamtanzahl zurückgelegter Wege im Modellperimeter steigt demnach zwischen 2017 und 2040 um 18.8 %. Dieses Wachstum resultiert einerseits aus dem Bevölkerungswachstum und andererseits aus den leicht veränderten Erzeugungsraten sowie der veränderten Altersstruktur der Bevölkerung.

Tabelle 38: Vergleich des Verkehrsaufkommens 2017-2040 (Binnenwege DWV)

	Berechnete Anzahl Wege 2017 [Mio]	Berechnete Anzahl Wege 2040 [Mio]	Veränderung [%]
Arbeit	0.64	0.74	+15.2
Ausbildung	0.22	0.25	+11.6
Einkauf	0.54	0.64	+19.2
Nutzfahrt	0.18	0.22	+23.8
Freizeit	0.54	0.66	+24.1
Gesamt	2.11	2.51	+18.8

Die Verschiebung der Fahrtzweckanteile an der Gesamtverkehrsnachfrage zwischen 2017 und 2040 ist aus Tabelle 39 ersichtlich. Die Pendlerwege (Arbeit und Ausbildung zusammen) betragen im Zustand 2040 nur noch einen Anteil von 39.1 % am Gesamtverkehrsaufkommen, was einer Abnahme von 1.5 Prozentpunkten gegenüber 2017 entspricht. Insbesondere der Anteil des Fahrtzwecks Freizeit (+1.1 %) nimmt dementsprechend zu.

Tabelle 39: Vergleich der Fahrtzweckanteile 2017 – 2040 (Binnenwege DWV)

	Anteil der berechneten Wege 2017 [%]	Anteil der berechneten Wege 2040 [%]	Veränderung
Arbeit	30.3	29.3	-0.9
Ausbildung	10.4	9.8	-0.6
Einkauf	25.5	25.5	+0.1
Nutzfahrt	8.5	8.8	+0.4
Freizeit	25.4	26.5	+1.1

Tabelle 40 zeigt die Veränderung der Verkehrsnachfrage innerhalb des Modellgebiets, aufgeteilt nach Fahrtzweck und Verkehrsmittel für die drei verschiedenen Prognosezustände «Mit Bypass, ohne DBL», «Mit Bypass, mit DBL» sowie «Ohne Bypass, mit DBL». Hier ist zu sehen, dass die wesentliche Zunahme des Verkehrsaufkommens im ÖV stattfindet. Die starke Kapazitätsauslastung des Strassennetzes, unverändertes Fuss- und Veloangebot sowie der Ausbau des ÖV-Angebots führen zu einem proportional tieferen Wachstum im MIV.

Werden die drei unterschiedlichen Prognoseszenarien miteinander verglichen ist zu erkennen, dass das Projekt DBL zu einem stärkeren Wachstum in der ÖV-Nachfrage führt als das Szenario ohne DBL. Dies vor allem auf Kosten des MIV, dessen Nachfrage-Wachstum in den Szenarien mit DBL tiefer ausfällt als im Szenario ohne.

Tabelle 40: Veränderung des Verkehrsaufkommens 2017 – 2040 (Binnenwege DWV, alle Wege):
Mit Bypass, ohne DBL / Mit Bypass, mit DBL / Ohne Bypass, mit DBL

[%]	MIV	ÖV	Velo	Fuss	Total
Arbeit	13.6/13.1/12.8	24.7/28.6/29.2	14.3/13.7/14.2	15.0/14.4/14.8	15.2
Ausbildung	11.5/9.9/9.7	14.7/15.6/15.7	9.0/9.2/9.2	11.2/11.3/11.2	11.6
Einkauf	15.8/15.2/15.1	19.9/23.5/24.5	21.2/22.9/23.1	25.0/24.7/24.5	19.2
Nutzfahrt	23.1/23.0/22.8	40.6/46.2/47.2	24.2/24.0/24.7	24.0/23.8/24.4	23.8
Freizeit	21.4/20.8/20.4	32.9/36.2/37.2	23.9/23.5/23.8	25.4/25.2/25.4	24.1
Gesamt	17.2/16.7/16.4	24.6/27.8/28.5	17.5/17.5/17.8	20.2/19.9/20.0	18.8

Tabelle 41 zeigt analog die Veränderung der interzonalen Wege. Verglichen mit allen Wegen fällt das Wachstum leicht höher aus.

Tabelle 41: Veränderung des Verkehrsaufkommens 2017 – 2040 (Binnenwege DWV, interzonale Wege): Mit Bypass, ohne DBL / Mit Bypass, mit DBL / Ohne Bypass, mit DBL

[%]	MIV	ÖV	Velo	Fuss	Total
Arbeit	13.9/13.4/13.1	25.4/29.6/30.2	15.0/14.4/14.9	14.9/14.3/14.7	15.6
Ausbildung	9.8/7.6/7.4	13.2/14.3/14.5	13.7/13.6/13.5	11.2/11.3/11.2	11.8
Einkauf	15.0/14.2/14.1	21.4/25.2/26.2	20.9/22.9/23.2	26.0/25.8/25.5	18.7
Nutzfahrt	23.5/23.3/23.1	42.1/48.1/49.2	25.5/25.2/26.0	25.6/25.3/26.1	24.3
Freizeit	21.6/20.9/20.5	33.6/37.1/38.2	24.9/24.4/24.8	26.9/26.6/26.9	24.6
Gesamt	17.2/16.7/16.4	25.2/28.6/29.4	19.2/19.1/19.5	20.9/20.7/20.8	19.1

10.5.2 Binnen- und Aussenströme

Die Aussenströme für das Jahr 2040 wurden wegen fehlender soziodemographischer Daten für die Aussenzonen mit einem vereinfachten Verfahren und ohne Anwendung des für die Binnenmatrizen angewendeten Ansatzes (vollständiges Nachfragemodell) berechnet. Die Aussenmatrizen für das Jahr 2040 wurden aus den Quelle-Ziel-Strömen 2017 und den ermittelten Wachstumsfaktoren pro Quelle-Ziel-Beziehung und Verkehrsmittel berechnet. Das Nachfragewachstum im Aussenverkehr wird aus dem Prognosemodell des NPVM (Verkehrsperspektiven Schweiz 2040) übernommen (siehe auch Kapitel 10.4). Die Wachstumsfaktoren an den Einfallsachsen sind nachstehend dargestellt.

Abbildung 62: Wachstumsfaktoren Aussenverkehr 2040-2017 (PW)

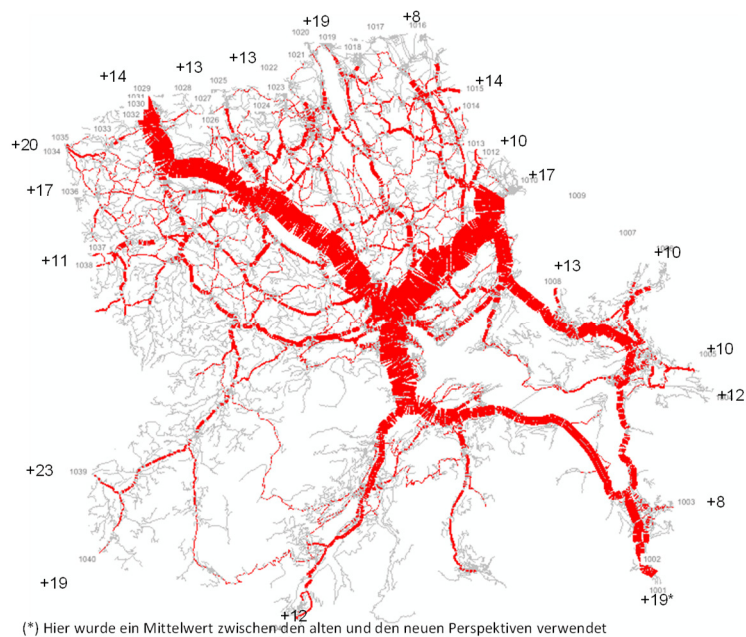


Abbildung 63: Wachstumsfaktoren Aussenverkehr 2040-2017 (ÖV)

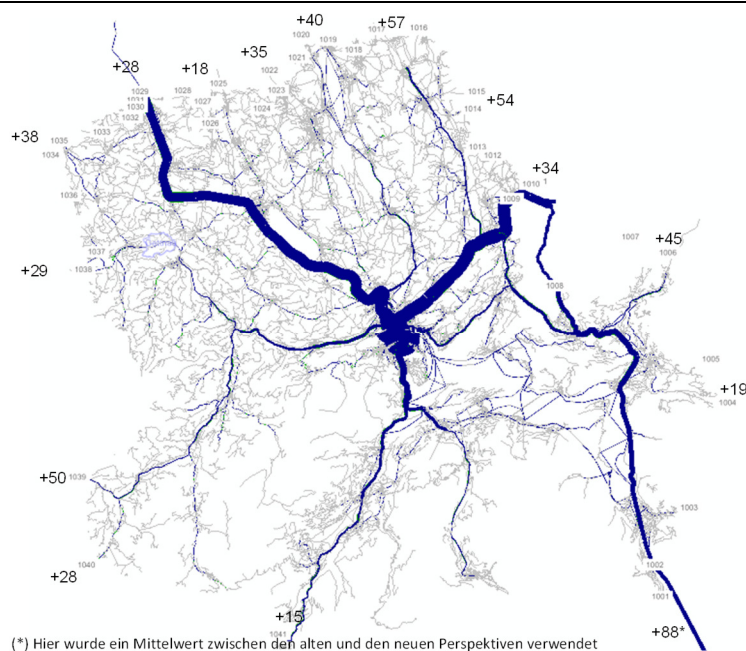


Tabelle 42 zeigt die Veränderung des Verkehrsaufkommens sowohl des Gesamtperimeters des GVM LU als auch aufgeteilt nach Binnen- und Aussenverkehr, auch hier für die drei unterschiedlichen Prognoseszenarien. Das PW-Aufkommen nimmt in allen drei Szenarien um ca. 16 % zu und es besteht kein grosser Unterschied zwischen dem Binnen- und Aussenverkehr.

Beim ÖV spielt das Projekt DBL eine grosse Rolle für das Wachstum. Ohne DBL steigt das Verkehrsaufkommen um ca. 32 % und mit DBL um ca. 40 %. Vor allem für die längeren Wege ist das Projekt von Bedeutung, die Zunahme beträgt beim Aussenverkehr ca. 55 %, während es beim Binnenverkehr ca. 32 % sind.

Tabelle 42: Verkehrsaufkommen 2040 und Veränderung gegenüber 2017 (Binnen- und Aussenströme DWV, in 1 000)

	2017	Ohne DBL, mit Bypass		Mit DBL, mit Bypass		Mit DBL, ohne Bypass	
		2040	[%]	2040	[%]	2040	[%]
Gesamt							
PW	1 331	1 546	16.0	1 541	16.7	1 539	15.6
LI	82	100	22.0	100	22.0	100	22.0
LW	31	38	22.0	38	22.0	38	22.0
LZ	23	28	22.0	28	22.0	28	22.0
Kfz	1 467	1 711	16.6	1 707	16.3	1 705	16.2
ÖV	296	390	32.2	414	39.8	414	40.3
Binnen							
PW	989	1 151	16.3	1 147	15.9	1 145	15.8
LI	50	61	22.0	61	22.0	61	22.0
LW	18	22	22.0	22	22.0	22	22.0
LZ	9	11	22.0	11	22.0	11	22.0
Kfz	1 066	1 245	16.7	1 241	16.4	1 240	16.2
ÖV	197	253	28.8	260	32.0	261	32.7
Aussen							
PW	341	394	15.3	394	15.1	394	15.1
LI	32	39	22.0	39	22.0	39	22.0
LW	13	16	22.0	16	22.0	16	22.0
LZ	14	17	22.0	17	22.0	17	22.0
Kfz	399	466	16.3	465	16.1	465	16.1
ÖV	99	137	38.9	153	55.3	153	55.3

Ähnlich wie bei den Anzahl Wegen sieht es bei der Verkehrsleistung aus (Tabelle 43). Diese steigt beim PW-Verkehr – unabhängig vom Szenario – um ca. 13-14 %. Die Verkehrsleistung im ÖV steigt mit dem Projekt DBL im Gesamtperimeter um ca. 42 %.

Bezogen auf den Kanton Luzern alleine beträgt die Zunahme der Verkehrsleistung im Strassenverkehr 15 % und im ÖV 36 %.

Tabelle 43: Fahr- bzw. Verkehrsleistung 2040 und Veränderung gegenüber 2017 (Binnen- und Aussenströme DWV, in 1 000)

	2017	Ohne DBL, mit Bypass		Mit DBL, mit Bypass		Mit DBL, ohne Bypass	
		2040	[%]	2040	[%]	2040	[%]
Gesamtperimeter GVM LU							
PW	13 328	15 210	14.1	15 148	13.7	15 081	13.2
LI	1 201	1 465	21.9	1 465	21.9	1 465	21.9
LW	457	558	21.9	578	21.9	578	21.9
LZ	500	610	21.8	610	21.8	610	21.8
Kfz	15 487	17 842	15.2	17 780	14.8	17 715	14.4
ÖV	4 395	5 879	33.8	6 245	42.1	6 264	42.5
Perimeter Kanton LU							
PW	8 164	9 399	15.1	9 363	14.7	9 310	14.0
LI	716	873	21.8	873	21.8	874	22.0
LW	289	352	21.8	352	21.8	352	22.0
LZ	318	387	21.7	387	21.7	388	21.9
Kfz	9 487	11 010	16.1	10 974	15.7	10 924	15.1
ÖV	3 146	4 127	31.2	4 277	36.0	4 293	36.5

In der Tabelle 44 ist die Entwicklung des Modal-Splits PW-ÖV zwischen 2017 und 2040 für die jeweiligen Szenarien zu erkennen. In allen ist im Vergleich zu 2017 eine Verschiebung hin zum ÖV zu erkennen, wobei der PW-Anteil 2040 noch immer gut zwei Drittel beträgt.

Tabelle 44: Modal-Split-Anteile 2017 und 2040, Verkehrsleistung (MIV- und ÖV-Pkm)

[%]	2017	2040		2040	
		Ohne DBL, mit Bypass	Mit DBL, mit Bypass	Mit DBL, ohne Bypass	Mit DBL, ohne Bypass
Gesamtperimeter GVM LU					
MIV	80.2	77.6	76.5	76.3	76.3
ÖV	19.8	22.4	23.5	23.7	23.7
Perimeter Kanton LU					
MIV	77.7	75.3	74.6	74.4	74.4
ÖV	22.3	24.7	25.4	25.6	25.6

10.5.3 Spitzenstunden

Aus den DWV-Matrizen für das Jahr 2040 wurden mit dem oben beschriebenen Verfahren die Matrizen für die Morgen- (MSP) und Abendspitzenstunde (ASP) sowie für den durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) ermittelt. Die Berechnung der Quelle-Ziel-Matrizen pro Nachfragesegment erfolgt anhand der DWV-Matrizen 2040 und den Anteilen der einzelnen Spitzenstunden am Tagesverkehr. Da für den Zustand 2040 keine Angaben zu Spitzenstundenanteilen bzw. Tagesganglinien vorhanden sind, werden hier die berechneten Spitzenstundenanteile aus den Modellzuständen 2017 übernommen. Damit wird angenommen, dass die Tagesganglinien 2040 gegenüber 2017 unverändert bleiben.

Die Berechnung der Spitzenstundenmatrizen erfolgt anhand der Spitzenstundenmatrizen 2017 und der Nachfrageveränderung zwischen 2017 und 2040. Aus den DWV-Matrizen 2040 und 2017 wird eine DWV-Differenzmatrix abgeleitet und mit den Spitzenstundenanteilen 2017 multipliziert. Daraus werden die Differenzmatrizen 2017-2040 für die einzelne Spitzenstundenmatrizen erstellt. Aus den Spitzenstundenmatrizen 2017 und den Nachfrageveränderungen einzelner Spitzenstunden 2017-2040 (Differenzmatrizen 2017-2040) werden die Spitzenstundenmatrizen 2040 zusammengestellt.

Die Eckwerte der aus diesen Berechnungen resultierenden Nachfragematrizen sind in Tabelle 45 dargestellt. Das Gesamtwachstum in den Spitzenstunden ist proportional etwa gleich wie jenes im DWV. Die Verkehrsnachfrage im motorisierten Verkehr nimmt in den ASP zwischen 2017 und 2040 um ca. 16 % und in der MSP um ca. 17 % zu. Die leichten Unterschiede bei den Wachstumsraten sind vor allem auf die Fahrtzweckstruktur der Verkehrsnachfrage sowie die Kapazitätsreserven der einzelnen Spitzenstunden zurückzuführen. Im ÖV beträgt die Zunahme ca. 33 % im Szenario ohne DBL und ca. 40 % im Szenario mit DBL.

Tabelle 45: Verkehrsnachfrage 2040 und Veränderung gegenüber 2017 (Binnen- und Aussenströme Spitzenstunden, in 1 000)

	2017	Ohne DBL, mit Bypass		Mit DBL, mit Bypass		Mit DBL, ohne Bypass	
		2040	[%]	2040	[%]	2040	[%]
PW-Fahrten							
ASP	129	150	16.2	149	15.9	149	15.8
MSP	89	104	17.4	104	17.1	104	16.9
ÖV-Wege							
ASP	30	40	33.4	42	41.5	42	42.0
MSP	27	35	30.7	38	40.3	38	40.7

10.5.4 Netzbelastungen

In Abbildung 64 bis Abbildung 71 sind folgende Differenzbelastungen zu sehen:

- Abbildung 64: Zunahme (rot) und Abnahme (grün) des Strassenverkehrs zwischen 2017 und 2040. Dargestellt ist der Zustand mit Bypass und ohne Durchgangsbahnhof.
- Abbildung 65: Identische Differenzbelastung wie Abbildung 55, reingezoomt auf die Agglomeration Luzern.
- Abbildung 66: Differenzbelastungen auf der Strasse, wenn zum Zustand mit Bypass und ohne Durchgangsbahnhof letzterer noch berücksichtigt wird.
- Abbildung 67: Differenzbelastungen auf der Strasse, wenn zum Zustand ohne Bypass und mit Durchgangsbahnhof ersterer noch berücksichtigt wird.

- Abbildung 68: Zunahme (rot) und Abnahme (grün) des öffentlichen Verkehrs zwischen 2017 und 2040. Dargestellt ist der Zustand mit Bypass und ohne Durchgangsbahnhof.
- Abbildung 69: Identische Differenzbelastung wie Abbildung 59, reingezoomt auf die Agglomeration Luzern.
- Abbildung 70: Differenzbelastungen des öffentlichen Verkehrs, wenn zum Zustand mit Bypass und ohne Durchgangsbahnhof letzterer noch berücksichtigt wird.
- Abbildung 71: Differenzbelastungen des öffentlichen Verkehrs, wenn zum Zustand ohne Bypass und mit Durchgangsbahnhof ersterer noch berücksichtigt wird.

Abbildung 64: Differenzbelastung Strasse 2040-2017 (Zustand 2040 mit Bypass ohne DBL, DWV)

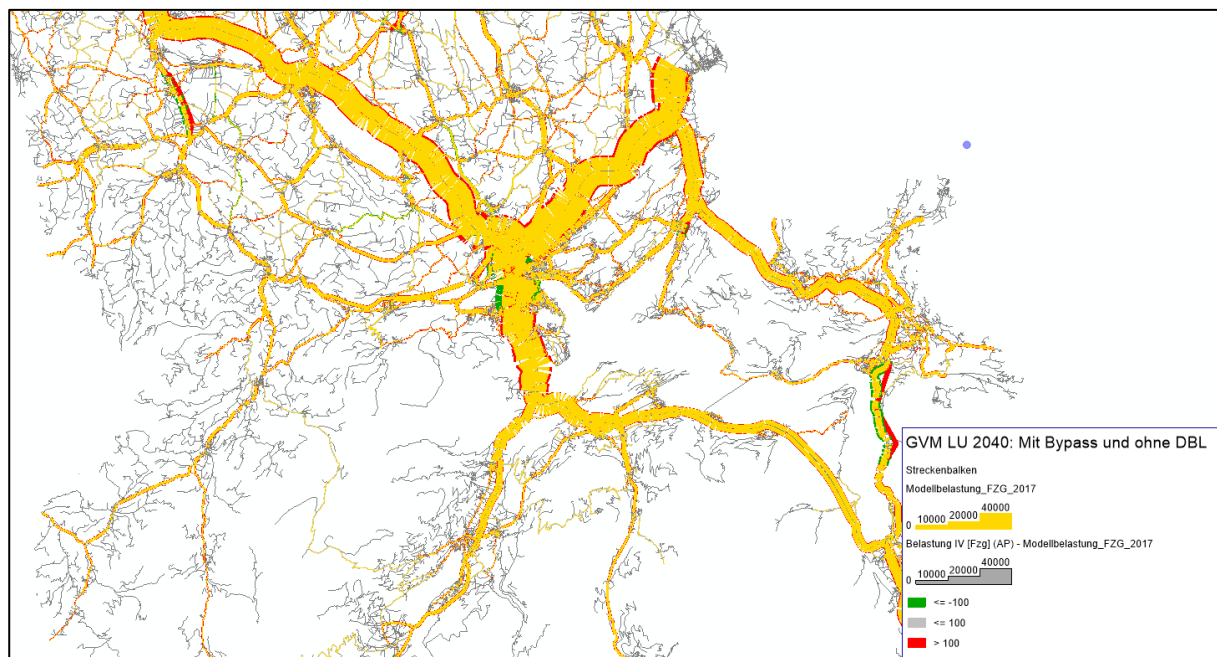


Abbildung 65: Differenzbelastung Strasse 2040-2017 (Zustand 2040 mit Bypass ohne DBL, DWV), Agglomeration Luzern

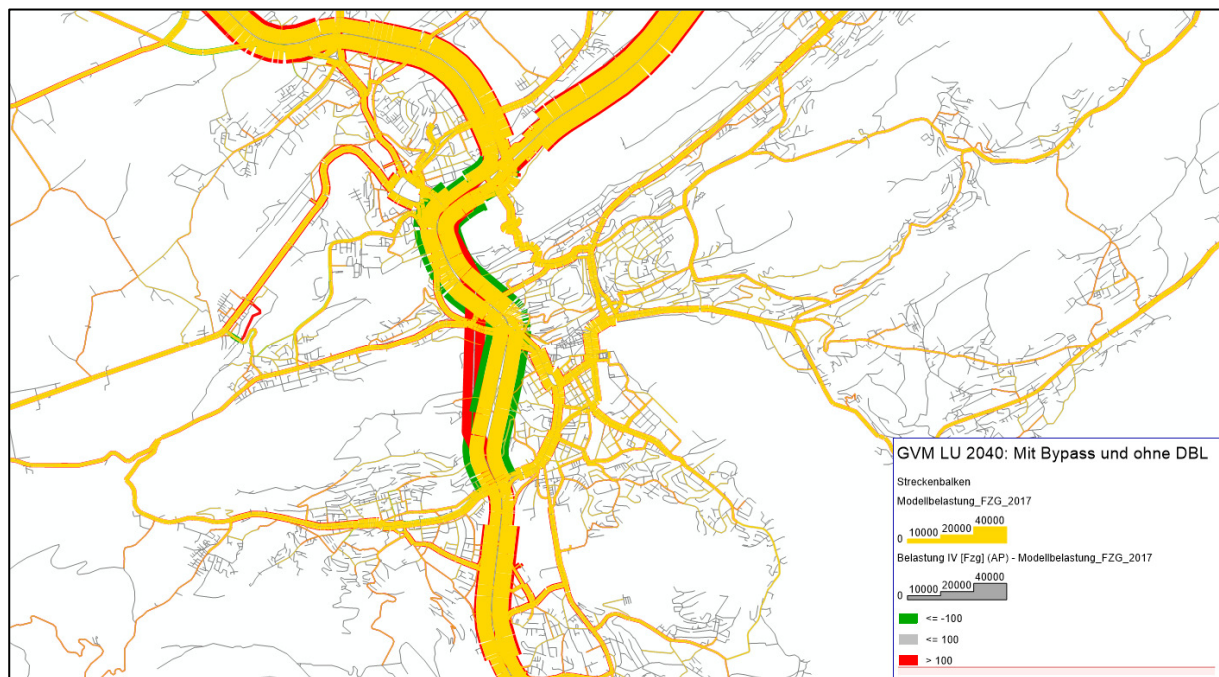


Abbildung 66: Differenzbelastung Strasse «Mit Bypass, mit DBL» vs. «Mit Bypass, ohne DBL»

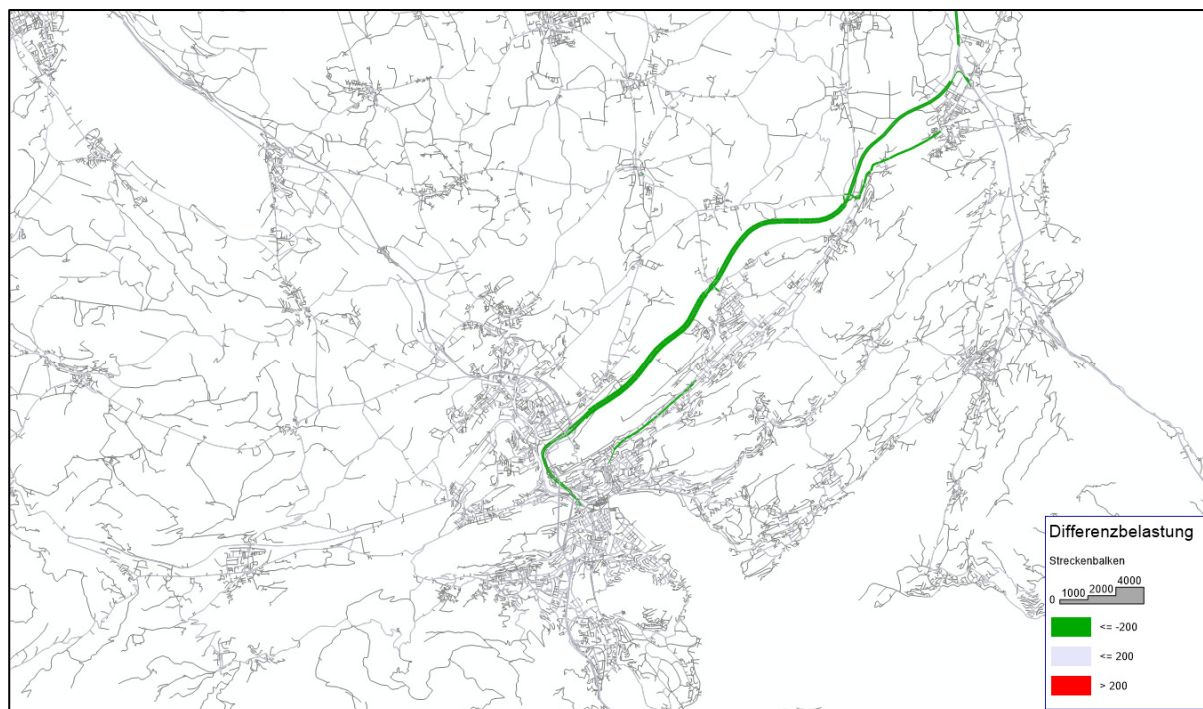


Abbildung 67: Differenzbelastung Strasse «Mit Bypass, mit DBL» vs. «Ohne Bypass, mit DBL»

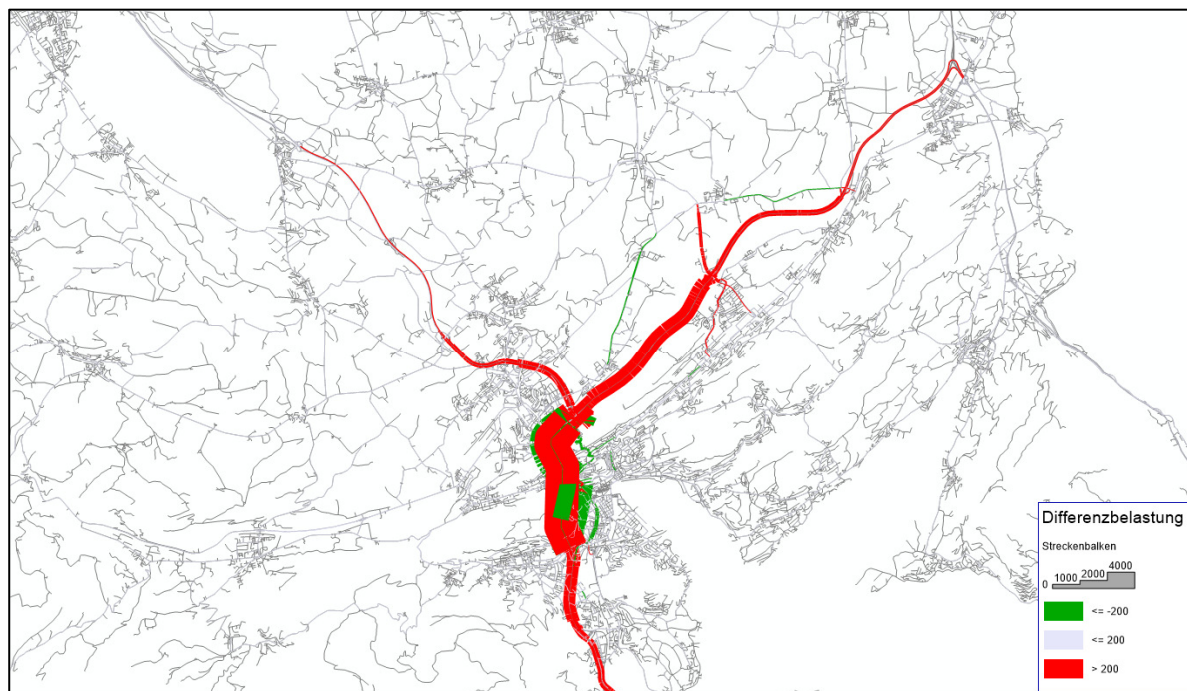


Abbildung 68: Differenzbelastung ÖV 2040-2017 (Zustand 2040 mit Bypass ohne DBL, DWV)

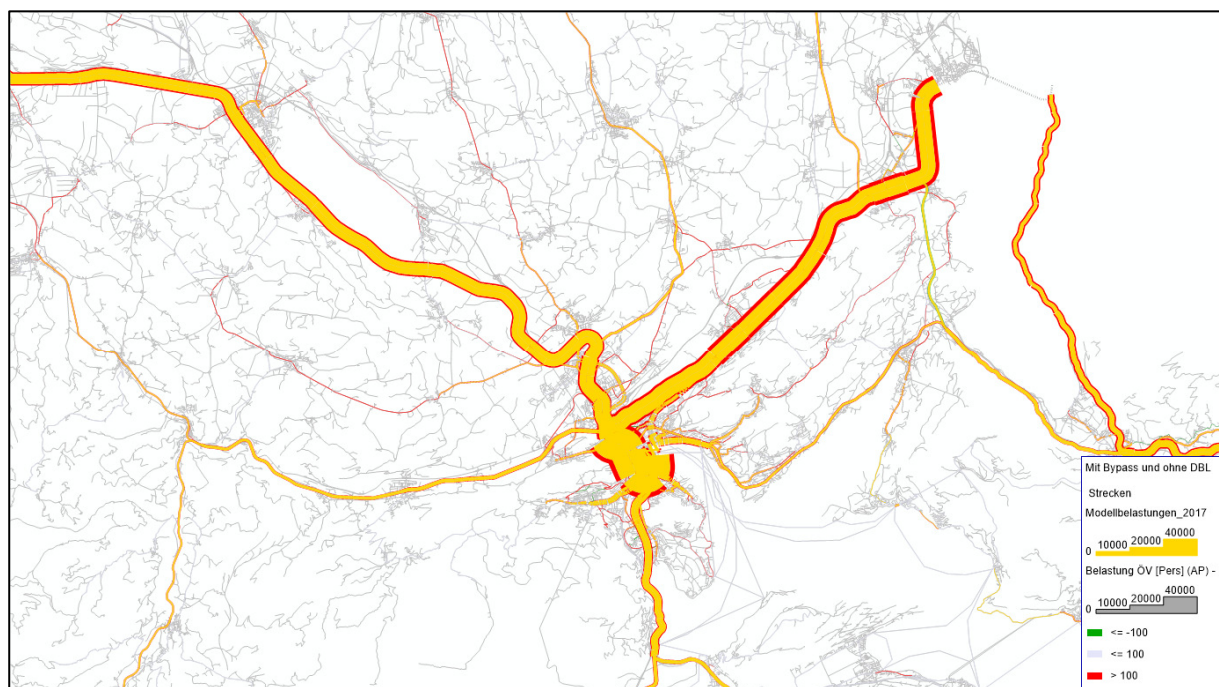


Abbildung 69: Differenzbelastung ÖV 2040-2017 (Zustand 2040 mit Bypass ohne DBL, DWV), Agglomeration Luzern

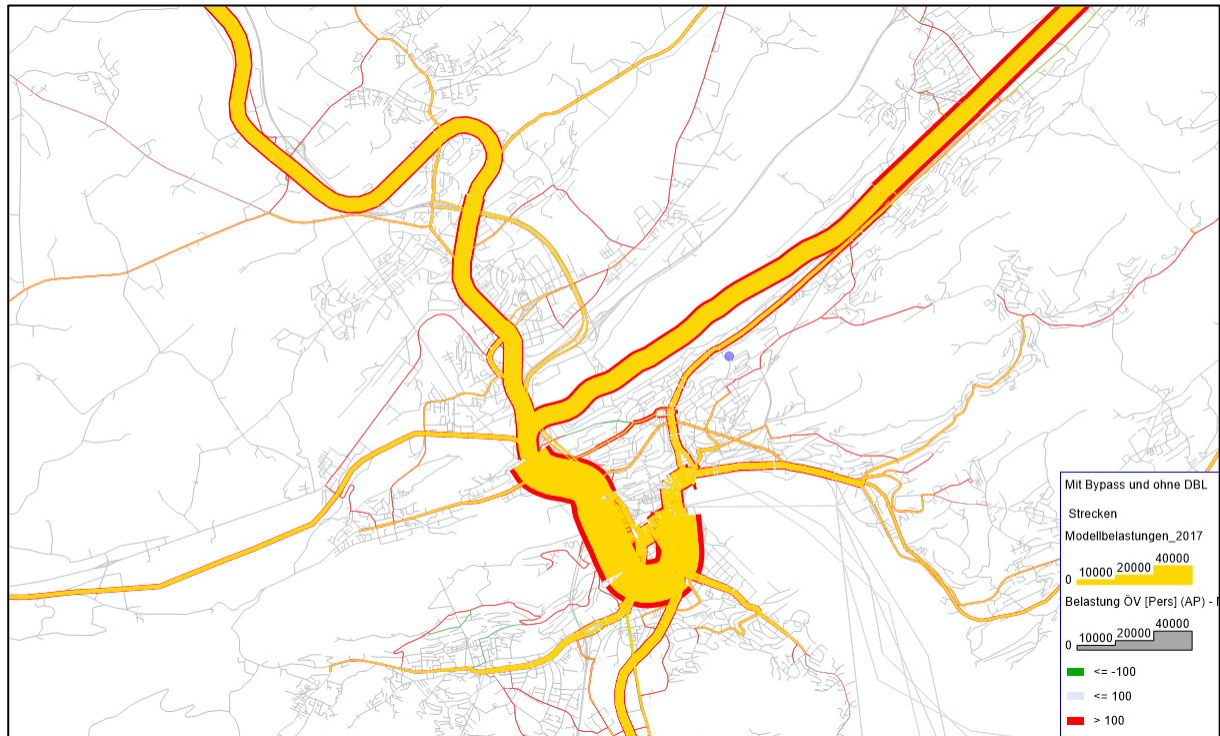


Abbildung 70: Differenzbelastung ÖV «Mit Bypass, mit DBL» vs. «Mit Bypass, ohne DBL»

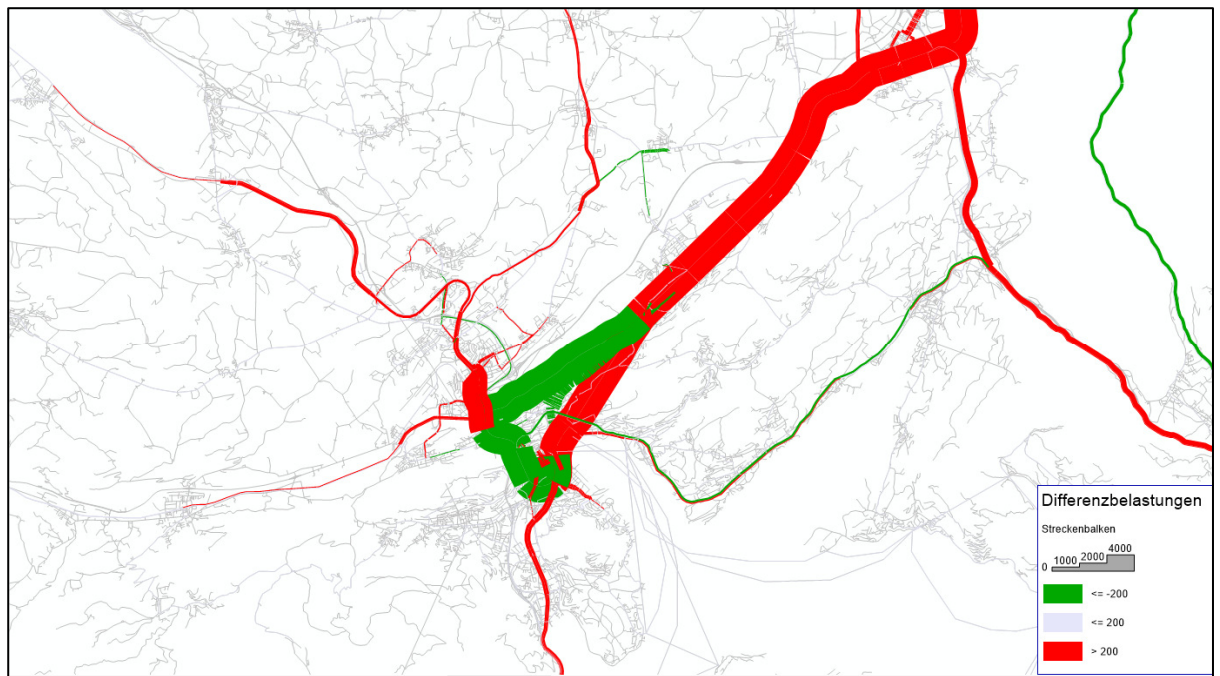
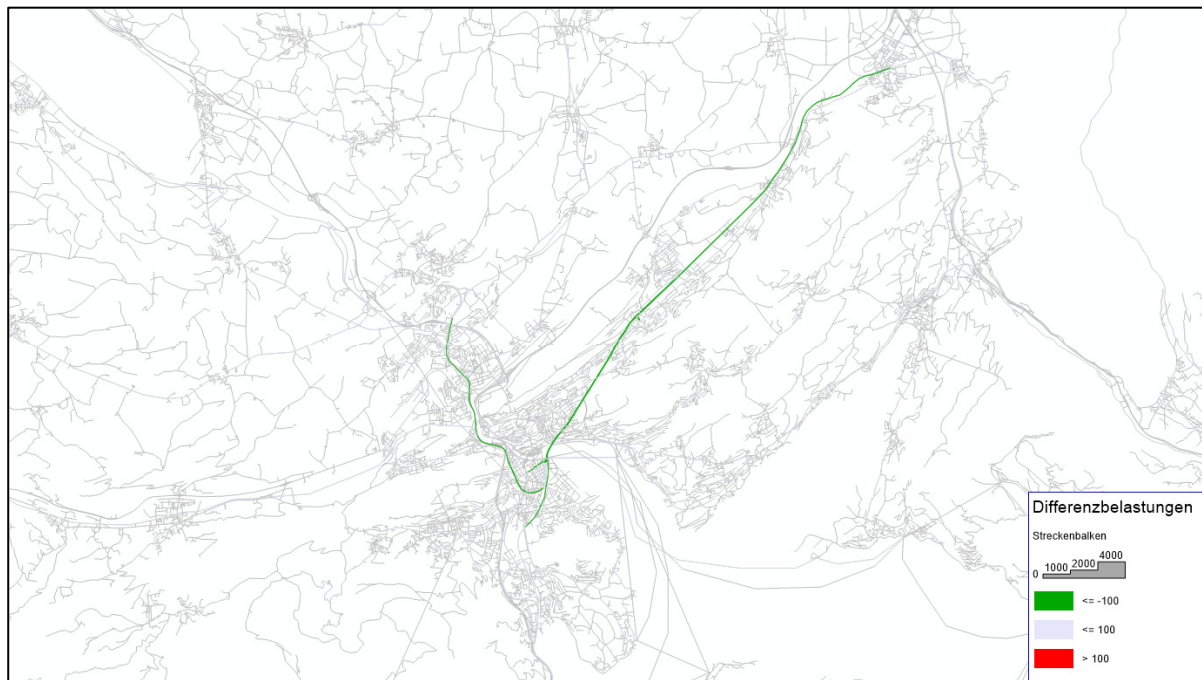


Abbildung 71: Differenzbelastung ÖV «Mit Bypass, mit DBL» vs. «Ohne Bypass, mit DBL»



11 Schlussfolgerungen

Aus den ermittelten Modellergebnissen und der durchgeführten Plausibilitätsanalyse kann gefolgert werden, dass die Zielsetzungen dieses Projektes vollständig erreicht wurden:

- die Erstellung eines prognosefähigen und massnahmesensitiven, multimodalen, fahrtzweck-spezifischen Verkehrsmodells
 - für den DWV;
 - für die Morgen- und Abendspitzenstunden;
 - für den DTV;
- Erstellung von Verkehrsprognosen für den Zeithorizont 2040.

Die erstellten Modelle wurden anhand aller verfügbarer Erhebungsdaten verifiziert. Dabei wurden sowohl die Modellstruktur und -inputs als auch die Modellergebnisse plausibilisiert. Somit ist die Erklärungskraft des Modells sowie seine Anwendbarkeit für konkrete Massnahmenplanungen und Verkehrsprognosen sichergestellt. Durch die Erstellung und Plausibilisierung des Modells sowie die dafür notwendigen und vorab durchgeführten Modellschätzungen, wurden die Grundlagen für die Berechnung von multimodalen Verkehrsnachfrageveränderungen und -prognosen im Kanton Luzern geschaffen.

Für die Erstellung von Netzmodellen sind, neben einem realitätsentsprechenden Verkehrsangebot, die Quelle-Ziel-Matrizen und die Verhaltensparameter die entscheidenden Grundlagen. Aus der durchgeführten Analyse der hier erstellten Quelle-Ziel-Matrizen und dem Vergleich mit den vorhandenen Erhebungsdaten konnte festgestellt werden, dass die Struktur der erstellten Matrizen den aus den Erhebungen abgeleiteten Gesetzmässigkeiten entspricht. Eine Eichung der Matrix wurde sowohl auf der Ebene der Matrixstruktur als auch auf der Ebene der Querschnittsbelastungen durchgeführt. Bei der Matrixstruktur wurden sowohl die Quelle-Ziel-Ströme als auch die Fahrtweitenverteilungen und die ermittelten Querschnittsbelastungen mit den Erhebungsdaten verglichen und darauf geeicht.

Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass die Abweichungen einer modellmässig erstellten und auf die Querschnittszählungen nicht kalibrierten Matrix, in der Regel deutlich grösser sind als die hier auftretenden Differenzen. Die höhere Genauigkeit ist vor allem auf eine sehr detaillierte Segmentierung des Modells durch die Bildung von Quelle-Ziel-Gruppen und die dementsprechend genau erstellten Erzeugungs-, Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodelle zurückzuführen. Die wesentliche Voraussetzung für diesen Ansatz war die Durchführung der Modellschätzungen mit den Stated-Preference- und Mikrozensus Daten sowie die Erstellung des simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodells. Mit den durchgeführten Modellschätzungen wird die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl geschätzt. Mit diesen Parametern wird die räumliche und modale Konkurrenz und damit auch die Verteilung und Aufteilung der Verkehrsströme angemessen abgebildet. Dies wurde durch die Überprüfung und Eichung der Matrixstruktur nochmals optimiert. Damit kann festgestellt werden, dass die erstellte Modellstruktur das Verkehrsverhalten sehr gut widerspiegelt.

Durch ein realitätsentsprechendes Verkehrsangebot, eine ebensolche Matrixstruktur sowie minimale Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen ist die Prognosefähigkeit des Modells gewährleistet. Die erstellten Modelle sind damit die Grundlage sowohl für die Aktualisierung von Quelle-Ziel-Matrizen als auch für die Beurteilung von Massnahmen und Verkehrsprognosen. Mit ihnen ist es möglich, Veränderungen und Auswirkungen des Verkehrsangebotes und der soziodemographischen und räumlichen Charakteristiken zu analysieren. Hier stehen vor allem Verkehrsangebotsmassnahmen und Siedlungsszenarien im Vordergrund. Dabei können die Nachfrageauswirkungen auf allen vier Modellstufen berechnet werden: Verkehrserzeugung, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl und Routenwahl. Diese

Funktionen wurden durch die Berechnung der Prognosezustände für das Jahr 2040 sowie die berechneten Angebotsszenarien getestet und validiert.

Somit stellt das GVM LU ein Planungsinstrument dar, das mit einer „state of the art“ Methodik und allen aus den Erhebungen verfügbaren Kenntnissen erstellt wurde. Durch dieses Vorgehen wurde sichergestellt, dass aus den verfügbaren Datengrundlagen sowie tiefgehendem Planungs- und Modellwissen das optimale Produkt erstellt wurde.

Es sollte gleichzeitig beachtet werden, dass bei der Kalibrierung der Modellzustände keine flächendeckenden Zählraten zur Verfügung standen und vor allem auf kleinräumiger Ebene (inkl. Knotenebene) die Modellbelastungen nicht validiert sind. Für kleinräumige Massnahmen oder Knotenstromanalysen konnten damit im Rahmen dieses Projekt keine Validierungen durchgeführt werden. Bei solchen Anwendungen ist es empfehlenswert, die Modellbelastungen anhand zusätzlicher Erhebungen zu überprüfen und entsprechende Modellplausibilisierungen, z.B. auf Ebene der Zonenanbindungen, durchzuführen. Hier empfiehlt es sich, im Vorfeld von Modellanwendungen die Netzbelastungen und die im Modell verfügbaren Zählraten zu analysieren und nach Bedarf im betrachteten Projektperimeter entsprechende Anpassungen oder Erweiterungen festzulegen.

Bei dem Prognosemodell ist zu beachten, dass die Modellergebnisse vor allem durch die Eingangsdaten und die dafür getroffenen Annahmen beeinflusst werden. Dafür sind die im Bericht beschriebenen Annahmen und Werte zur Siedlungs- und Angebotsentwicklung, sowie weitere Grössen wie Mobilitätsraten, PW-Besetzungsgrade, Entwicklung des Aussenverkehrs, etc. bei der Interpretation von Modellergebnissen zu beachten. Hier ist auch zu beachten, dass bei den Nachfrageprognosen die Kapazitätsbeschränkungen im ÖV nicht berücksichtigt wurden, da diese Daten nicht zur Verfügung standen.

12 Erweiterungsmöglichkeiten

Auf der konzeptionellen Ebene wären mittelfristig die Erweiterungen mit folgenden Modellkomponenten zu überprüfen:

- **ÖV-Kapazitätsauslastung:** Aufbereitung der notwendigen Datengrundlagen für die Abbildung der ÖV-Kapazitätsauslastung bei der Berechnung der Ziel- und Verkehrsmittelwahleffekte im Nachfragemodell und eine entsprechende Erweiterung der Modellkomponenten.
- **Modellierung von Auswirkungen des automatisierten Fahrens:** Erweiterung der bestehenden Modellkomponenten und Datengrundlage für die Abbildung des automatisierten Fahrens. Die Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das Verkehrsaufkommen und den Bedarf an Verkehrsinfrastrukturen in der Schweiz wird in der Verkehrspolitik immer aktiver diskutiert. Auf Grundlage von Nutzungsszenarien für das teil- und vollautomatisierte Fahren, sowie den notwendigen Erweiterungen mit Daten und Modellkomponenten, wäre die Ermittlung von verkehrlichen Auswirkungen mit dem GVM LU im Rahmen von entsprechenden Szenarien zu empfehlen.
- **Abfahrtszeitmodell und dynamische Umlegungsmodelle:** Für die Nachfragelenkung stellen Massnahmen wie z.B. Mobility Pricing ein wesentliches Instrument dar. Um die Auswirkungen solcher Massnahmen während des Tages zu untersuchen, stellen die Abfahrtszeitmodelle sowie dynamischen Umlegungsmodelle sehr wichtige Modellgrundlagen dar, um die zeitliche Verschiebung der Verkehrsnachfrage während des Tages zu ermitteln. Dafür wäre eine Erweiterung des GVM LU mit solchen Modellkomponenten sehr zu empfehlen, um geeignete Instrumente bei solchen verkehrspolitischen Fragestellungen auch rechtzeitig zur Verfügung zu haben.
- **Feinere Abbildung der Interaktion zwischen Fahrzeugen an städtischen Knoten:** In diesem Bereich gibt es interessante softwaretechnische Neuentwicklungen (SBA, Simulation Based Dynamic Assignment bzw. Rückstaumodell), welche aber eine entsprechende Datengrundlage und Modellierungsaufwendungen verlangen. Insbesondere in Kombination mit einem dynamischen Modell könnten die Stau- und Überlastungsbereiche wesentlich besser abgebildet werden. Mit diesen Verfeinerungen könnten die städtischen Strassennetze wesentlich genauer abgebildet werden.

13 Literatur

Bundesamt für Raumentwicklung (2010), Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK, Referenzzustand 2030, Durchschnittlicher Werktagsverkehr, Stundenfeine Matrizen, Morgen- und Abendspitzenstunden und Durchschnittlicher Tagesverkehr.

Bundesamt für Raumentwicklung (2014), Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK, Aktualisierung auf den Basiszustand 2010

Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2016) Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040. Hauptbericht und Technische Bericht, Bern.

Bundesamt für Raumentwicklung und Bundesamt für Statistik (2012) Mobilität in der Schweiz – Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010, Bundesamt für Statistik, Bern.

Bundesamt für Statistik (2011) Erwerbstätige Bevölkerung nach Wohn- und Arbeitsgemeinde – Pendlermatrix auf Basis Registerverknüpfung Ende 2011, Bern.

Department for Transport (2017) Transport analysis guidance: WebTAG, Department for Transport, London.

Federal Highway Administration (1997) Model validation and reasonableness checking manual, Federal Highway Administration, Washington.

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (2006) Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen, FGSV Verlag, Köln.

Fröhlich, P., T. Wiczorek und M. Vrtic (2012) Nationales Personen- und Güterverkehrsmodell des UVEK, Zonen- und Netzstrukturen des Nationalen Personenverkehrsmodells, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern.

Fröhlich, P., K.W. Axhausen, M. Vrtic, C. Weis und A. Erath (2012) SP-Befragung 2010 zum Verkehrsverhalten im Personenverkehr, ARE, Ittigen.

Keller M., R. Frick, R. Zbinden, P. Leyboldt, U. Matthes und S. Rommerskirchen (2004) Perspektiven des Schweizerischen Personenverkehrs bis 2030, Entwurf Schlussbericht für das ARE, ASTRA, BAV und BFE, Bern.

Ortuzar, J.D. und L.G. Willumsen (2011) *Modelling Transport*, Wiley, Hoboken.

Rapp Trans (2015) Tiefbahnhof Luzern: Nutzenstudie, für vif und VVL, Luzern.

Sammer, G., Röschel, R., Gruber, Chr. (2012) Qualitätssicherung für die Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen und Verkehrsprognosen, Entwurf eines Merkblattes. Projekt QUALIVERMO, Forschungsbericht, *Schriftenreihe Strassenforschung*, 604, bmvit und ASFINAG, Wien.

Schnabel, W. und D. Lohse(1997), Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und Straßenverkehrsplanung, Band 2. Verlag für Bauwesen, Berlin.

Vrtic, M., K.W. Axhausen, M.G.H. Bell, S. Grosso und W. Matthews (2004) Methoden zur Erstellung und Aktualisierung von Wunschlinienmatrizen im motorisierten Individualverkehr, Schlussbericht für SVI 2000/379, *Schriftenreihe*, 1066, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern.

Vrtic, M., P. Fröhlich, K.W. Axhausen, C. Schulze und P. Kern (2005), Verkehrsmodell für den öffentlichen Verkehr des Kantons Zürich, Im Auftrag des Amtes für Verkehr, Kanton Zürich, IVT, Ernst Basler + Partner und PTV Karlsruhe, Zürich.

Vrtic, M., P. Fröhlich, C. Schulze, S. Erne und M. Arendt (2010) Gesamtverkehrsmodell Kanton Zürich, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich, Zürich.

Vrtic, M., C. Weis und P. Fröhlich (2012) Gesamtverkehrsmodell für den Personenverkehr des Kantons Zürich: Modellkalibrierung 2011, AFV, Zürich.

Vrtic, M., C. Weis, P. Fröhlich, R. Pohlner, J. Pillat, B. Bodenmann, P. Burki und C. Philipp (2012) Neues Verkehrsmodell Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Aarau.

Vrtic, M., C. Weis, P. Fröhlich, B. Bodenmann und A. Zeiler (2015) Gesamtverkehrsmodell Kanton Zug, Amt für Raumplanung, Zug.

Vrtic, M., C. Weis, G. Rindsfuser und W. Matthews (2018) Kalibrierung von Capacity-Restraint-Funktionen, Schlussbericht VSS 2015/113, *Schriftenreihe*, 1628, Bundesamt für Strassen, UVEK, Ittigen.

Weis, C., M. Vrtic und P. Fröhlich (2012) Schätzung der Modellparameter für das Gesamtverkehrsmodell Zürich und das Kantonale Verkehrsmodell Zug, AFV, Zürich und AfR, Zug.

Weis, C., M. Vrtic, K.W. Axhausen und B. Schmid (2017) Analyse der SP-Befragung zur Verkehrsmodus- und Routenwahl, ARE, Ittigen.