

Masterthesis Studiengang MSE Civil Engineering

Erweiterung des kantonalen Verkehrsmodells Aargau um ein radtypenspezifisches Verhaltensmodell

Student:

Noè Fiabane
4143 Dornach
noe.fiabane@students.fhnw.ch

Examinator:

Prof. Dr. Alexander Erath
FHNW
Hofackerstrasse 30
4132 Muttenz
+41 61 228 54 26
alexander.erath@fhnw.ch

Externe Betreuer:

Robert Simon
TransOPTIMA

Simon Schmutz
Abteilung für Verkehr AVK,
Kanton Aargau

Juli 2025

Kurzfassung

In der Verkehrsplanung haben sich Verkehrsmodelle zur Quantifizierung und Beurteilung der Auswirkungen komplexer planerischer Fragestellungen etabliert. Viele dieser Modelle bilden den Radverkehr jedoch nur bedingt ab. Es stellt sich daher die Frage, inwiefern sich bestehende Modellierungsinstrumente an die aktuellen Entwicklungen, insbesondere im Bereich Radverkehr, adaptieren lassen. Im Kanton hat sich die Anzahl an Haushalten mit mindestens einem E-Bike von 2010 bis 2021 verzehnfacht (BVU AVK, 2023). Am Beispiel des kantonalen Verkehrsmodell Aargau (KVM-AG), das den Veloverkehr bereits explizit abbildet, wird untersucht, wie dieses um ein radtypenspezifisches Verhaltensmodell erweitert werden kann. Hierzu werden verschiedene Erweiterungsansätze konzipiert und implementiert, unter anderem in Form von Radnutzungsquoten und streckenspezifischen Wahrnehmungsfaktoren.

Die Erkenntnisse aus dem Einbau zeigen, welche Erweiterungen bereits heute in einem aggregierten Modell umsetzbar sind und an welchen Stellen datenbezogene sowie konzeptionelle Limitationen bestehen. Die Integration von E-Bikes in das aktuelle Modell erweist sich als vergleichsweise einfach umsetzbar, da wesentliche Grundlagen mit dem bereits bestehenden Verkehrsmittel Velo gelegt wurden. Nationale Erhebungen wie der Mikrozensus Verkehr und Mobilität (MZMV) und weitere Forschungsarbeiten liefern zudem differenzierte Informationen zum Radverkehr. Beispielsweise unterscheiden sich die Radtypen Velo und langsames E-Bike in den beobachteten mittleren Geschwindigkeiten von 12,6 und 14,3 km/h (BVU AVK, 2023). Dies wirkt sich insbesondere auf die Distanzverteilungen aus. Das E-Bike legt im Schnitt um 2,2 km längere Etappen zurück als das Velo mit 3,5 km Etappenlänge (BVU AVK, 2023).

Anhand von zwei Fallbeispielen wird der Mehrwert der Erweiterungen untersucht. Dabei steht in dieser Arbeit weniger die genaue Vorhersage oder Grössenordnung der Wirkung im Vorder-

grund, sondern vielmehr das Zusammenspiel von verschiedenen Wirkungsmechanismen. Dabei zeigt sich, dass das E-Bike aufgrund seiner Eigenschaften im Modell gegenüber dem Velo differenziert reagiert, sei es durch den geringeren Steigungswiderstand aufgrund der Tretunterstützung oder der kleineren Differenz zur Geschwindigkeit des MIV. Die Szenarien aus den Fallbeispielen werden ebenso im Ursprungsmodell versucht einzubauen. Hierbei zeigt sich, dass die Zeitersparnis durch den Wegfall eines weiteren Verkehrsmittel sich in den Szenarien rächen kann. Ein Einbau wird komplexer, benötigt mehr Annahmen und birgt das Risiko Wirkungszusammenhänge zu unterschätzen. Insbesondere das Potenzial des E-Bikes gegenüber dem MIV wird im Ursprungsmodell unterschätzt.

Im erweiterten Modell können Thematiken die radtypenspezifische Fragestellungen betreffen folglich einfacher eingebaut und bearbeitet werden. Hierbei zeigt sich, dass die Verschiebungen zu mehr E-Bikes sich folglich auch in einer anderen Distanzverteilung äussert, wodurch insbesondere der MIV absolut am meisten Verkehrsleistung verliert. Aufgrund der erheblichen Defizite in der Datenverfügbarkeit kann die genaue Wirkungsgrösse jedoch nicht beurteilt werden und es muss sich auf den Wirkungsmechanismus beschränkt werden.

Derzeit sind keine Definitionen einheitlicher, radtypenspezifischer Widerstandsgrössen zur Einordnung der Wirkungsweise von Streckentypen vorhanden. Beim E-Bike kommt hinzu, dass aufgrund des geringen Anteils am Gesamtverkehr je nach Aggregationsstufe die benötigte Beobachtungsanzahl für eine robuste Kalibrierung zu gering ist. Dies ist einer der Gründe, weshalb schnelle und langsame E-Bikes zusammen abgebildet werden. Insbesondere die schnellen E-Bikes haben einen sehr geringen Anteil am Gesamtverkehr. Zudem mangelt es grundsätzlich an einem dichten Netz an Fahrradzahlstellen, um die Umlegung des Radverkehrs zu validieren. Folglich weisen die eingebauten Erweiterungen in der Robustheit Defizite auf, erfüllen jedoch die gewünschten Funktions- und Wirkungsweisen.

Trotz bestehender Herausforderungen in der Datenbeschaffung drängt sich der Einbezug von radtypenspezifischen Komponenten mittelfristig auf. Eine Rückführung von bereits differenziert vorhandenen Daten auf einen allgemeinen Radmodus erscheint wenig zielführend. Insbesondere für Fragestellungen, die eine flexible Verschiebung der Radverkehrszusammensetzung erfordern, ist die Abbildung des E-Bikes als eigener Modus zentral. Zugleich zeigen politische Entwicklungen, wie die Förderung des Langsamverkehrs (LV), dass die Relevanz des Themas weiter zunehmen wird. Mit dem wachsendem Anteil elektrischer Fahrzeuge kann sich insbesondere die Datengrundlage für E-Bikes verbessern. Auch der Bundesrat sieht in hochwertigen Radverkehrsanlagen wie Velobahnen (2024) eine Chance zur Entlastung des Strassennetzes. Nicht zuletzt verpflichtet das Veloweggesetz (2023) die Planungsbehörden dazu, ihr Velonetz zu überarbeiten. Da die Kantone für deren Planung zuständig sind, existieren somit viele radspezifische Fragestellungen die künftig an das KVM-AG herangetragen werden könnten.

Gleichzeitig gilt es, den richtigen Zeitpunkt für eine umfassende Erweiterung sorgfältig zu wählen. Zwar scheint der modelltechnische Einbau von E-Bikes ausgereift, doch die eigentliche Einschränkung liegt derzeit in der unzureichenden Datengrundlage. Der aktuellste MZMV von

2021 ist pandemiebedingt verzerrt. Die letzte unbeeinflusste Erhebung ist somit über zehn Jahre her. Eine Umsetzung zum jetzigen Zeitpunkt wäre daher mit Unsicherheiten behaftet. Es empfiehlt sich, auf die baldige Veröffentlichung des MZMV von 2025 abzuwarten. Ergänzende Studien könnten zusätzliche Kenngrößen für die nationale Modellierung liefern. Damit kann die Basis für eine erfolgreiche Erweiterung des KVM-AG um ein radtypenspezifisches Verhaltensmodell gelingen.

Schlagworte

Radverkehr, E-Bike, Verkehrsmodell, Kantonales Verkehrsmodell Aargau, Steigung

Zitierungsvorschlag

Fiabane, Noè (2025) Erweiterung des kantonalen Verkehrsmodells Aargau um ein radtypenspezifisches Verhaltensmodell, MSE Civil Engineering, FHNW, Muttenz

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Publikationen, Vorlagen und Hilfsmitteln als die angegebenen benutzt habe. Alle Teile meiner Arbeit, die wortwörtlich oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Gleiches gilt für von mir verwendete Internetquellen. Die Arbeit ist weder von mir noch von einem/einer Kommilitonen/in bereits in einem anderen Kontext vorgelegt worden. Für die Fehlersuche, Vorschläge und Verbesserungen des LaTeX- sowie R-Codes und zur Überprüfung der Orthografie wurden KI-Tools wie ChatGPT verwendet.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Ausgangslage und Problemstellung	9
1.2	Ziel	10
1.3	Methodik	10
2	KVM-AG	12
2.1	Modellaufbau	12
2.2	Verfahrensablauf	14
2.2.1	Nachfragemodell	15
2.2.2	Umlegungsmodell	17
2.3	Abbildung des Veloverkehrs	17
2.3.1	Velowiderstand	18
2.3.2	Veloaffinität	21
3	Datengrundlagen und Funktionstests	22
3.1	Methodik	22
3.2	Differenzierung der Radtypen	23
3.3	Modalsplit	24
3.3.1	Datengrundlage	24
3.3.2	Aufbereitung und Implementierung	26
3.4	Netzmodell	27
3.4.1	Streckengeschwindigkeit	28
3.4.2	Steigungswiderstandsfaktor	31
3.4.3	Streckenspezifischer Wahrnehmungsfaktor	35
3.4.4	Rüstzeit	40
3.4.5	Wahrgenommener Faktor zur Knotendichte	41
3.5	Radnutzungsquote	48
3.5.1	Daten und Methodik	48
3.5.2	Umsetzung im Modell	51
3.5.3	Interpretation und Bewertung	58
4	Modellintegration und Kalibrierung	60
4.1	Raumtypenbeziehung	60
4.1.1	Grundlage	60
4.1.2	Kalibrierung	61
4.1.3	Auswertung	62
4.2	Nach ÖV-Güteklasse differenzierte Radnutzungsquote	64
4.2.1	Grundlage	64
4.2.2	Kalibrierung	64

4.2.3	Auswertung und Interpretation	66
4.3	Distanzverteilung	67
4.3.1	Grundlage	67
4.3.2	Kalibrierung	69
4.3.3	Auswertung	70
4.4	Streckenspezifischer Wahrnehmungsfaktor	71
4.4.1	Grundlage	71
4.4.2	Einbau	71
4.4.3	Auswertung Nachfragemodell	73
4.4.4	Auswertung Umlegungsmodell	73
4.5	Zwischenfazit	75
5	Fallbeispiele	78
5.1	Methodik	78
5.2	Modellzustand	79
5.3	Fallbeispiel A: Ausbau der kantonalen Velorouten zu Radwegen	80
5.3.1	Szenario	80
5.3.2	Einbau der Radwege	80
5.3.3	Auswertung Analyse- und Prognosemodell	84
5.3.4	Auswertung Distanzen und Verkehrsleistung	86
5.3.5	Vergleich zu Originalmodell (DvD)	90
5.3.6	Zwischenfazit	92
5.4	Fallbeispiel B: Erhöhung der E-Bike-Nutzungs-/Besitzquote	93
5.4.1	Szenario	93
5.4.2	Einbau	93
5.4.3	Auswertung	95
5.4.4	Vergleich zu Originalmodell (DvD)	95
5.4.5	Zwischenfazit	97
5.5	Fallbeispiel AB: Kombination der Fallbeispiele A und B	98
5.5.1	Vergleich zu Originalmodell (DvD)	98
5.6	Auswertung aller Fallbeispiele	98
5.7	Fazit	106
6	Synthese	108
6.1	Einordnung	108
6.2	Daten- und Modellgrenzen	109
6.3	Handlungsempfehlung	111
7	Danksagung	114
	Glossar	115

Literaturverzeichnis	117
Abbildungsverzeichnis	120
Tabellenverzeichnis	123
Anhang	124

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

In der Verkehrsplanung werden seit Jahrzehnten aggregierte Verkehrsmodelle für Fragestellungen zur Entwicklung des Verkehrsnetzes und zur Wirkungsabschätzung verkehrplanerischer Massnahmen eingesetzt. Diese erlauben eine Schätzung der verkehrlichen Auswirkungen grosser Infrastrukturprojekte bei gleichzeitig überschaubarem Rechenaufwand. Viele der derzeit verwendeten Verkehrsmodelle dienen ursprünglich der Bearbeitung von Projekten des motorisierten Individualverkehrs (MIV) sowie des öffentlichen Verkehrs (ÖV). Eine detaillierte Abbildung des Langsamverkehrs (LV) war darin in der Regel nicht vorgesehen.

In jüngster Zeit gewinnt die Planung des Radverkehrsnetzes sowie des Fahrradverkehrs im Allgemeinen in der Schweiz an Bedeutung. Das Veloweggesetz (BV, 2023) verpflichtet die Kantone, ihr Radnetz grundlegend zu überarbeiten und ein Freizeit- und Alltagsnetz zu planen und umzusetzen. Neben der veränderten rechtlichen Lage hat sich auch die Zusammensetzung des Radverkehrs weiterentwickelt. Die Zahlen aus dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) des Bundesamts für Statistik (BFS) und Bundesamts für Raumentwicklung (ARE) belegen, dass der Anteil von E-Bikes und S-Pedelecs am Radverkehr bzw. am Modal-split zunimmt (BFS und ARE, 2023). Der zunehmende Stellenwert des LV wird auch durch die Verkehrsperspektiven des ARE unterstrichen. In allen Szenarien zeigen sich steigende Weglängen für Velos und E-Bikes. Generell wird mit einem Anstieg der Verkehrsleistung im LV gerechnet (ARE, 2016). Für den effizienten und bedarfsgerechten Auf- und Ausbau dieser Netze sind Entscheidungsgrundlagen erforderlich, die differenzierte Informationen zur Radverkehrsentwicklung liefern können. Daher stellt sich die Frage, ob und wie etablierte Verkehrsmodelle an diese Entwicklung angepasst werden können.

Ein Beispiel für ein etabliertes und fortgeschrittenes Verkehrsmodell ist das kantonale Verkehrsmodell Aargau (KVM-AG). In diesem wird der Veloverkehr bereits explizit abgebildet und sowohl eine Nachfrage als auch eine Streckenbelastung ausgegeben. Zudem werden Faktoren wie Steigung und Verkehrsbelastung berücksichtigt. Das KVM-AG eignet sich daher für eine vertiefte Analyse der Erweiterung der Abbildung des Radverkehrs in einem bestehenden Verkehrsmodell.

Auch im Aargau ist eine dynamische Entwicklung des Radverkehrs spürbar. Im Kanton hat sich die Anzahl an Haushalten mit mindestens einem E-Bike von 2010 bis 2021 verzehnfacht (BVU AVK, 2023). Gleichzeitig legen E-Bikes deutlich längere Distanzen zurück. Die mittlere Etappenlänge für langsame E-Bikes liegt bei 5,7 km, für Velos hingegen bei 3,5 km (BVU AVK, 2023). Gerade für Distanzen im mittleren Bereich (5,1 bis 7 km) wird im Kanton über die Hälfte der Ausgänge das Auto genutzt (BVU AVK, 2023). Das Zielbild aus der Mobilitätsstrategie des Kantons sieht eine Zunahme des Radverkehrs bei gleichzeitiger Abnahme des MIV vor (AVK, 2016). Dies verdeutlicht das Potential zur Verkehrsverlagerung durch E-Bikes bei mittleren Distanzen. Auf der anderen Seite besteht aus Sicht des Kantons beim Veloverkehr ein bedeuten-

der Handlungsbedarf. Im Standbericht von 2022 wird unter anderem darauf hingewiesen, dass in nahezu allen Räumen Herausforderungen bei der Bereitstellung ausreichender Flächen für einen sichere Fahrradverkehrsführung bestehen (AVK, 2022).

Diese Entwicklungen stellen neue Anforderungen an die Verkehrsmodellierung und im konkreten Fall an das KVM-AG. Werden die veränderte Nachfrage- und Distanzverteilung durch die Entwicklung im Radverkehr nicht berücksichtigt, können Prognosen zu den Auswirkungen von Projekten verfälscht werden. Gerade bei der Bewertung von (Rad-)Infrastrukturprojekten, Siedlungsentwicklungen und Verkehrskonzepten wäre eine differenzierte Abbildung des Radverkehrs erforderlich, um Fragestellungen im LV fundierter bearbeiten zu können. Um konkrete Projekte gezielter priorisieren und das vorhandene Potenzial im Fahrradverkehr besser ausschöpfen zu können, muss das heutige Modell auf die bevorstehenden Herausforderungen vorbereitet werden.

1.2 Ziel

Ziel dieser Masterarbeit ist es, zu untersuchen, wie ein bereits bestehendes Verkehrsmodell um ein radtypenspezifisches Verhaltensmodell erweitert werden kann. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, inwiefern eine solche Differenzierung und Erweiterung die Aussagekraft und Sensitivität des Modells verbessert. Hierbei liegt insbesondere der Fokus auf verkehrsplanerischen Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Fahrradverkehr.

Im Rahmen der Implementierung werden sowohl die modelltechnische Umsetzbarkeit als deren Auswirkung untersucht. Neben der Implementierung wird untersucht, in welchen relevanten Bereichen Datenlücken bestehen und wo weiterer Forschungs- und Umsetzungsbedarf besteht. Ziel ist es, einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Verkehrsmodellierung im Bereich des Radverkehrs zu leisten, um die heutigen Modelle besser für die künftigen Fragestellungen vorzubereiten.

1.3 Methodik

Um die Komplexität der Realität in einem Modell abbilden zu können, sind Annahmen und Vereinfachungen notwendig. Sowohl das Strassennetz als auch die Zonen und Strukturdaten werden abstrahiert dargestellt, um eine überschaubare Berechnung zu ermöglichen. Hinzu kommen Einschränkungen bei der Datenverfügbarkeit. Oftmals mangelt es nicht an Ideen zur verbesserten Abbildung des Radverkehrs, sondern an der Datengrundlage sowie den Limitationen eines Verkehrsmodells.

Vor diesem Hintergrund wird am konkreten Beispiel des KVM-AG untersucht, wie sich verschiedene konkrete Erweiterungen einbauen lassen. Hierzu werden verschiedene Stufen durchlaufen, um die Mach-, Implementier-, sowie Kalibrierbarkeit aufgrund der heutigen verfügbaren Datengrundlage zu untersuchen. Die erste Vorauswahl der konkret zu untersuchenden Erweiterungen basieren auf den Erkenntnissen des zuvor durchgeführten Vertiefungsprojekts (Fia-

bane, 2025). Die Vorauswahl der Erweiterungen ist daher nicht Bestandteil dieser Arbeit. In dem vorhergegangenen Projekt wurde unter anderem mittels Literaturrecherchen, Experteninterviews und Analysen der verfügbaren Daten bereits eine Filterung verschiedener Ansätze vorgenommen. Die Empfehlung jener Arbeit sieht vor, dass eine Differenzierung des Radverkehrs in die Verkehrsmittel Velo, E-Bike und S-Pedelec vorrangig erscheint.

Um ein vollständiges Verständnis über die Modellierung und Abbildung des Veloverkehrs zu erhalten, wird in einem ersten Schritt die Funktionsweise des KVM-AG genauer erläutert. Aufgrund der so festgehaltenen Ausgangslage im Modell und den Erkenntnissen des Vertiefungsprojekts werden ausgewählte Modellerweiterungen implementiert. Konkret untersucht werden folgende Anpassungen:

- Anpassung und Spezifikation Fahrgeschwindigkeit des Velos und E-Bikes
- Anpassung und Spezifikation des Steigungswiderstandsfaktors
- Einbau eines streckenspezifischen Wahrnehmungsfaktors
- Einbau einer Rüstzeit
- Wahrgenommener Faktor zur Knotendichte
- Radaffinität nach Raumtypenbeziehung
- Spezifische Radnutzungsquote nach ÖV-Güteklasse

Die verschiedenen Untersuchungspunkte werden auf ihre Tauglichkeit hin bewertet. D.h. es wird untersucht, ob die Erweiterungen die gewünschte Wirkung im Modell erzielen. Dabei dient die Datenverfügbarkeit, welche für eine akkurate Kalibrierung zwingend notwendig ist, als Ausschlusskriterium. Dazu kommt das Potential der Aussagefähigkeit des Modells sowie die Limitationen der Modellierungssoftware.

Hierbei ist insbesondere zu beachten, dass es sich um ein aggregiertes Modell handelt. Folglich werden insbesondere jene Erweiterungen ausgeschlossen, welche einen aktivitäten- oder agentenbasierten Modellansatz voraussetzen. Ist die erste Implementierung gelungen und die Datenverfügbarkeit ausreichend, wird das Modell kalibriert, sodass sie für eine Anwendung in Fallbeispielen verwendet werden können.

Die anschließenden Fallbeispiele dienen der Prüfung und Visualisierung der Gebrauchstauglichkeit sowie der Einordnung der Auswirkungen. Insbesondere soll damit aufgezeigt werden, ob sich der Einbau aus Sicht von möglichen Fragestellungen aus der Verkehrsplanung eignen und ob dies die Aussagekraft des Modells mit der Erweiterung erhöhen konnte. Hierfür wird eine Differenz von Differenzen-Analyse (DvD-Analyse) vorgenommen, welche die Wirkung von Massnahmen zwischen Ursprungsmodell und erweitertem Modell vergleicht. Basierend auf den Erkenntnissen wird eine Empfehlung zur Tauglichkeit der Erweiterungen abgegeben sowie Limitationen der Erweiterungen aufgezeigt.

2 KVM-AG

Das kantonale Verkehrsmodell Aargau (KVM-AG) ist ein mit der Modellierungssoftware PTV Visum erstelltes makroskopisches Verkehrsmodell. Das KVM-AG deckt den gesamten Kanton Aargau ab sowie die angrenzenden Gebiete im In- und Ausland. Es wird für verschiedene Anwendungen herangezogen, insbesondere dient es als Entscheidungshilfe für diverse kantonale Verkehrsprojekte.

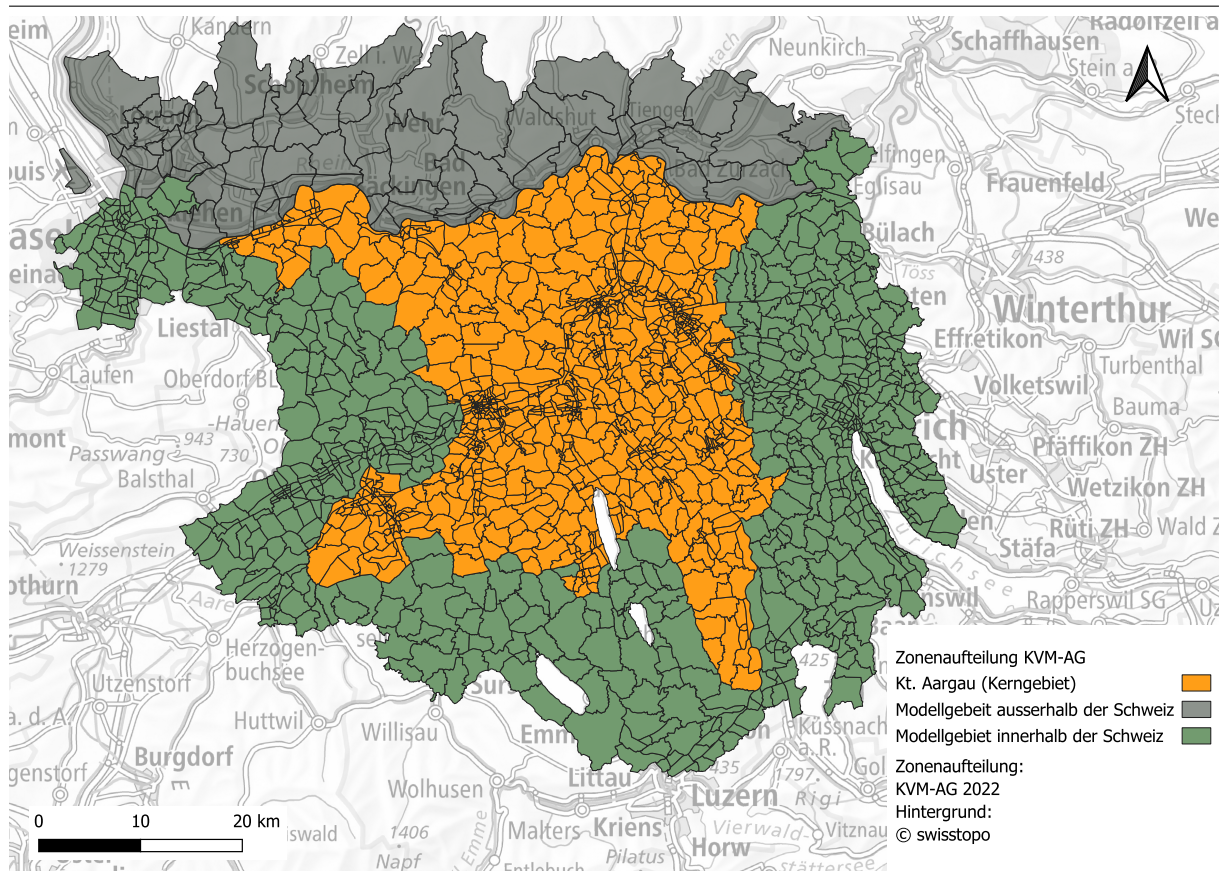
Da es sich bei dem Modell um ein Gesamtverkehrsmodell handelt, kann der Radverkehr nicht isoliert von den anderen Verkehrsmitteln betrachtet werden. Um die Übersicht zu wahren, werden die Verfahrensabläufe zunächst unabhängig vom Verkehrsmodus beschrieben. Danach folgt die Darstellung des Radverkehrs im aktuellen KVM-AG. Eine ausführliche Erklärung der Abläufe und der Abbildung der verschiedenen Modi ist im Modellbescrieb zum KVM-AG (BVU AVK, 2024) zu finden. Die Mechaniken und Funktionsweise von PTV Visum lassen sich im Handbuch der PTV Gruppe finden (Visum, 2023).

Nachfolgend werden die Modellteile beschrieben, welche für die spätere Erweiterung um ein radspezifisches Verhaltensmodell relevant sind. Unveränderte Modellfunktionen werden hierbei nicht näher beschrieben. Da sich die Fragestellung hauptsächlich auf den Modus Velo bezieht, werden die anderen Modi hierbei ebenfalls nicht weiter beschrieben.

2.1 Modellaufbau

Das KVM-AG erstreckt sich über den ganzen Kanton Aargau sowie die angrenzenden Gebiete (Abb. 1). Insgesamt werden knapp 2'000 Zonen abgebildet. Ebenso ist das Strassennetz, in leicht vereinfachter Form, vorhanden. Im Modell existiert sowohl ein Personenverkehrsmodell, in welchem unter anderem das Velo angesiedelt ist, sowie ein Güterverkehrsmodell. Da das Velo nur im Personenverkehr abgebildet ist, wird das Güterverkehrsmodell nicht näher beschrieben.

Abbildung 1: Übersichtskarte Zonengebiete KVM-AG



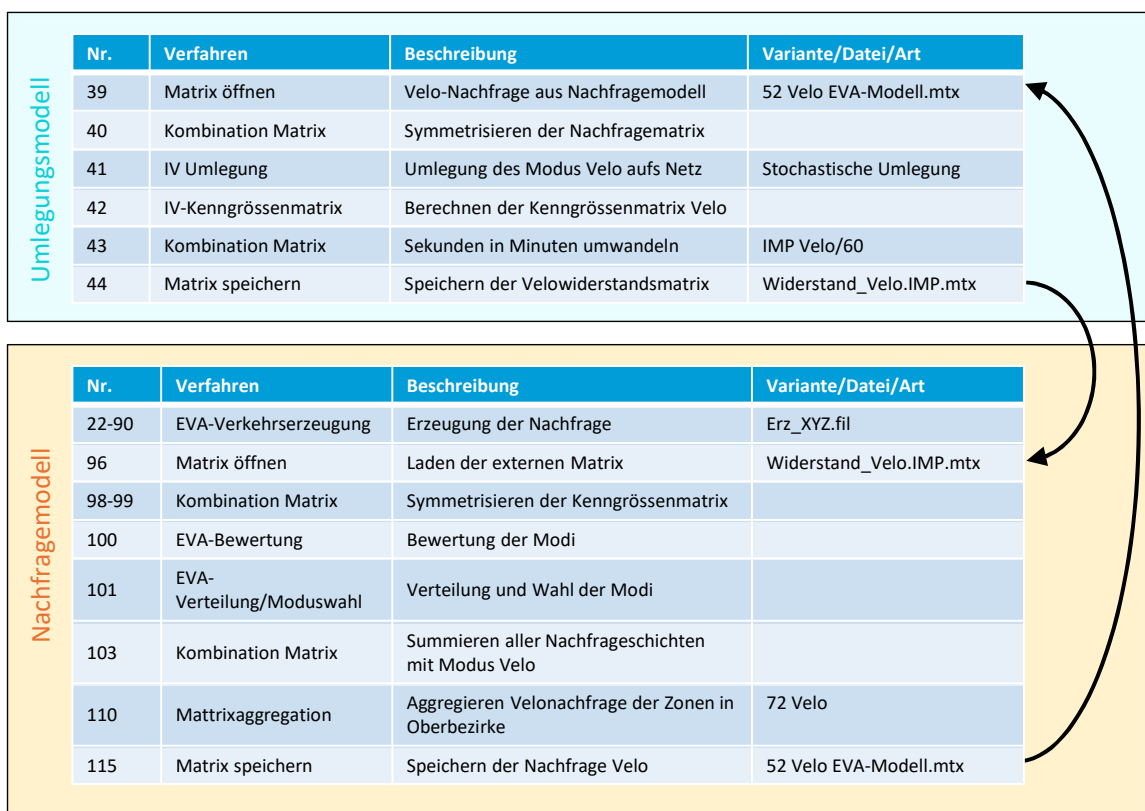
Karte wurde mit QGIS Version 3.42 erstellt

Das KVM-AG besteht aus mehreren Modellen, welche aufeinander aufbauen. Je nach Fragestellung und Anwendung kommen verschiedene Modellversionen zum Einsatz. Es existieren Prognosemodelle, wie beispielsweise ein Modell für 2040, und Analysemodelle, welche den Ist-Zustand abbilden. Das KVM-AG wird regelmässig überarbeitet. Die letzte für den Radverkehr relevante Überarbeitung war die «OASE-Anpassung», in welcher unter anderem der Radverkehr nochmals überarbeitet und kalibriert wurde. Das aktuell vom Kanton zur Verfügung gestellte Modell, später Ursprungsmodell genannt, erhielt im Rahmen dieser Überarbeitung unter anderem einen Velowiderstand anstatt einer reinen Reisezeit sowie Affinitätsfaktoren um unterschiedliche Grundnutzen darzustellen (Weis und Vrtic, 2022). Da es sich bei der Erweiterung des Radverkehrs um den Ist-Zustand handelt, ist für die weitere Betrachtung das neueste Analysemodell relevant.

2.2 Verfahrensablauf

Beim Verfahrensablauf steht die Funktionsweise der einzelnen Modellabläufe, sprich der Erzeugung, Verteilung und Umlegung im Vordergrund. Es werden insbesondere die für den Radverkehr wichtigen Verfahrensschritte beschrieben. Es handelt sich folglich nicht um eine Beschreibung des gesamten Verfahrensablaufes, sondern um Teile davon. Für ein vollständiges Verständnis des Modells wird sowohl das Modellhandbuch KVM-AG (BVU AVK, 2024) sowie das Handbuch von PTV-Visum (2023) empfohlen.

Abbildung 2: Vereinfachter Verfahrensablauf KVM-AG



Eigene Darstellung basierend auf dem KVM-AG Version 2022

Das Ursprungsmodell ist in zwei von einander getrennte Modelle aufgeteilt (Abb. 2). Zum einen in ein Nachfragemodell, in welchem die benötigte Nachfrage zwischen den Bezirken erzeugt wird und die Verkehrsmittelwahl erfolgt, und in ein Umliegungsmodell. Im Umliegungsmodell werden die erzeugte Verkehrsnachfrage zwischen den Zonen auf die Strecken umgelegt, sodass eine streckenfeine Belastung entsteht. Im Umliegungsmodell wird ebenso die Kenngrossenmatrizen berechnet, welche wiederum vom Nachfragemodell benötigt werden. Durch diese

Rückkopplung kann es nötig sein, dass das Modell mehrmals durchlaufen muss, um Rückkopplungen wie den Einfluss von Verkehrsüberlastung oder anderen belastungsabhängige Kenngrößen korrekt vom Modell berücksichtigt werden.

2.2.1 Nachfragemodell

Im Nachfragemodell wird die Verkehrsnachfrage berechnet. Für den Personenverkehr wird hierfür das EVA-P-Modell angewandt. Es existiert ebenso ein Güterverkehrsmodell, welches mit dem klassischen Vier-Stufen-Verfahren abläuft. Dieses wird hier jedoch nicht näher beschrieben, da sich der Radverkehr aktuell auf den Personenverkehr beschränkt.

Das EVA-Verfahren erlaubt eine simultane Berechnung der Verkehrsverteilung und Verkehrsmittelwahl. Durch die Verknüpfung der Erzeugung und der Verteilung werden Differenzen ausgeglichen, welche bei den klassischen Rechenansätzen entstehen. Als Ergebnis des EVA- respektive Nachfrageverfahrens werden nach Modus getrennte Datenmatrizen, welche die Nachfrage zwischen den Bezirken enthalten, ausgegeben. Das EVA-Verfahren ist in Visum in drei Rechenschritten aufgeteilt.

In der **EVA-Verkehrserzeugung** wird das grundsätzliche Verkehrsaufkommen einer jenen Zone errechnet. Es basiert auf Strukturgrößen, wie der Verkaufsfläche oder der Einwohnendenanzahl einer Zone. Es beschreibt folglich die Attraktivität einer Zone, um Nachfrage zu generieren respektive anzuziehen. Mit der Strukturgröße wird folglich die Attraktivität einer Zone beschrieben. Mit den Nachfrageschichten wird die Strukturgrößen respektive Potential in Nachfrage für verschiedene Arten von Nachfragen aufgeteilt. Als Nachfrageschicht gilt beispielsweise die Beziehung Wohnen-Arbeit oder Wohnen-Einkaufen. Diese Nachfrageschicht existiert für jede Art von abgebildeten Beziehungen. Die Nachfragebeziehungen verweisen folglich auf ein Aktivitätenpaar (Visum, 2023). Hierbei werden ebenso die Randsummen berechnet. Die Randsummen dienen im EVA-Modell als Ausgleich, sodass beim Quell- und Zielaufkommen keine Differenzen entstehen. An dieser Stelle wird jedoch nicht tiefer auf diese eingegangen. Als Ergebnis dieses Rechenschrittes stehen die Quell- und Zielaufkommen einer jener Zone.

Ist die Verkehrserzeugung berechnet, folgt die **EVA-Bewertung**. Wie der Name bereits beschreibt, bewertet diese die verschiedenen Modi. Zur Bewertung werden die Kosten einer Fahrt W berechnet. Die Bewertung erfolgt im EVA-Modell nach Aufwandsart getrennt. Die Aufwände werden durch eine Nutzenfunktion getrennt, transformiert und anschliessend zusammen multipliziert. Eine Aufwandsart a beschreiben beispielsweise die Reisezeit, Billettkosten oder Affinitäten.

$$W_{ijk} = M_{ijk} \cdot C_{ijk} \cdot P_{ijk} \quad (1)$$

Quelle: Visum, 2023

Hierbei gilt: P_{aijk} ist ein Aufwand von Zone i nach Zone j für den Modus k . (Visum, 2023). M ist

die Modusverfügbarkeit und C die Kapazitätsauslastung. Beide werden im aktuellen KVM-AG nicht verwendet und liegen daher standardmässig bei 1. Somit gilt im Originalmodell:

$$W = 1 \cdot 1 \cdot P \quad (2)$$

Die Aufwandsarten c_{aijk} können nach belieben definiert werden. In der Regel werden diese als Kenngrössenmatrizen eingelesen. Es ist jedoch auch möglich feste Konstanten anzugeben oder Attribute aus Quell- oder Zielzonen zu wählen. Vom EVA-Modell werden dabei immer die die Reisezeit a' , die konkurrierende Fusswegzeit a'' und externe Bewertungsmatrix a''' benötigt. Danach können benutzerdefinierte Aufwände a hinzugefügt werden. Die Faktoren werden multipliziert zu einem Produkt von allen Aufwandsarten a aus dem Aufwandsset A . Dieses wird wiederum als Faktor mit der Differenz Reisezeit Modus k und Fusswegzeit und der externen Bewertungsmatrix multipliziert, sodass am Ende das Produkt P als Bewertungswahrscheinlichkeit steht (Visum, 2023).

$$P_{ijk} = [f_{a'}(c_{a'ijk}) - f_{a''}(c_{a''ijk})] \cdot f_{a'''}(c_{a'''ijk}) \prod_{a \in A} f_a(c_{aijk}) \quad (3)$$

Quelle: Visum, 2023

Im EVA-Modell erfolgt die Aufwandsbewertung jeweils über eine Bewertungsfunktion f_a . Diese können durch verschiedene vorgegebene Transformationsfunktionen erstellt werden, aber auch direkt ohne Transformation in die Bewertung miteingehen.

Als letzter Schritt folgt die **EVA-Verteilung und Moduswahl**. Bei dieser wird die in EVA-Bewertung durchgeführte Bewertung der Fahrt W verwendet, und der Modus sowie die Anzahl an Fahrten zwischen zwei Zonen für jeden Modus bestimmt (T_{ijk} , Formel 4).

Dies wird für jede Nachfrageschicht durchgeführt, wobei für den Analysefall die starren Vorgaben des Modalsplits für jede Nachfragebeziehung verwendet wird. Der Modalsplit wird erst im Prognosemodell gelockert, sodass sich der Modalsplit verschieben kann. Das Analysemodell ist jenes Modell, welches den aktuellen Zustand abbildet. Es wird mittels Erhebungen, Befragungen und Zählstellen kalibriert, sodass es den IST-Zustand repräsentiert. Schaltet man das Modell um, damit es eine Prognose abgeben kann, ist vom Prognosemodell die Rede.

Im Prognosefall wird hierbei der Bilanzfaktor des jeweiligen Modus verwendet f_{ak} . Dieser wird im Analysefall berechnet und gibt an, wie die Verkehrsverteilung respektive die Anzahl Fahrten berechnet wird. Der Bilanzfaktor ist dabei der Faktor der benötigt wird, sodass der vorgegebene starre Modalsplit erreicht wird. Der gleiche Bilanzfaktor wird dann verwendet, um im Prognosefall, welcher ohne starren Modalsplit fungiert, die Berechnung durchführen zu können. Nebst diesem Faktor existieren sowohl für das Quellaufkommen f_{qi} sowie für das Zielaufkommen f_{qi} Bilanzfaktoren. Diese werden so berechnet, dass die Randsummen bei der Berechnung eingehalten werden. Die Bilanzfaktoren entstehen folglich beim Lösen des Gleichungssystems und

fungieren als Ausgleich.

$$T_{ijk} = W_{ijk} \cdot f_{qi} \cdot f_{qj} \cdot f_{ak} \quad (4)$$

Quelle: Visum, 2023

Am Ende des EVA-Verfahrens werden für jeden Modus und Nachfrageschicht eine Matrix mit den Fahrten zwischen den Zonen ausgegeben. Diese können nach belieben aggregiert werden. Im KVM-AG werden für das Einlesen in das Umlegungsmodell die einzelnen Nachfrageschichten nach Modus zusammengefasst, sodass man eine Matrix mit allen Fahrten eines Verkehrsmittel erhält. Diese tragen jeweils den Namen *Modus EVA.mtx*.

Die EVA-Datenmatrizen können danach beliebig aggregiert werden. Im aktuellen Modell werden die knapp 2'000 Zonen nach Oberbezirken zusammengefasst. Oberbezirke sind in der Regel auf der Auflösungsstufe Gemeinde festgelegt. Das Aggregieren nach Oberbezirken ermöglicht eine schnellere Übersicht bei gleichzeitig kleinerem Datenvolumen.

2.2.2 Umlegungsmodell

Das Umlegungsmodell liest die *Modus EVA.mtx*-Matrizen ein, sodass die Anzahl an Verkehrsnachfrage zwischen den Zonen bekannt ist. Die Nachfrage werden nun auf das Netzmodell umgelegt. Dies bedeutet, dass die Belastungen zwischen den Zonen nun auf das Strassennetz gelegt werden. Dies wird stochastisch getan, in dem der Netzwidestand als Kenngrösse verwendet wird. Dieser setzt sich zusammen aus den Streckenwiderständen, Knotenwiderständen sowie weitere benutzerdefinierte Widerstände. Die für das Nachfragemodell benötigte Kenngrössenmatrizen werden nach der Umlegung berechnet und abgespeichert. Dies erfolgt nach der Umlegung, da für gewisse Kenngrössen wie die Reisezeit die Verkehrsbelastung mit einbezogen wird. Der Widerstand, in der Regel die Reisezeit, wird dann abgespeichert und anschliessend vom Nachfragemodell eingelesen. Die Kenngrössenmatrix enthält auf der Diagonalen ursprünglich keinen Widerstand, sprich die Reisezeit ist bei null. Dieser wird erst im Verfahrensablauf des Nachfragemodells eingeführt über eine vorhandene Matrix mit den entsprechenden Kenngrössen.

2.3 Abbildung des Veloverkehrs

Der Veloverkehr ist Teil des Personenverkehrs. Er wird im KVM-AG bereits über den Velowiderstand explizit abgebildet. Hierbei wird sowohl die Reisezeit aber auch die Affinität bereits mitberücksichtigt. An dieser Stelle werden insbesondere die Modellteile genauer erläutert, welche für die spätere Erweiterung mit einem radtypenspezifischen Verhaltensmodell relevant werden.

Die Verkehrsnachfrage wird, wie beschrieben, in der EVA-Verkehrserzeugung generiert. Damit diese Nachfrage auf die Modi aufgeteilt werden kann, werden für alle Modi Aufwandsarten definiert. Für den Modus Velo sind im Modell bereits sechs Aufwandsarten definiert: Affinität,

Alter, Alter quadriert, Konstante, Velowiderstand und nicht Heimat Gewichte. Als Nicht Heimat Gewichte versteht man hierbei Wegbeziehungen, welche nicht als Start oder Ziel den Wohnort haben.

Nach erfolgten Bewertung wird die Nachfrage zwischen den Zonen auf die einzelnen Modi aufgeteilt. Damit das EVA-Verteilung dies umsetzen kann, wird der Modalsplit für jede Nachfragegeschichte einzeln benötigt. Nach erfolgtem Durchlauf werden unter anderem die Kenngrössenmatrix *Velo EVA-Modell* ausgegeben. Diese Matrix enthält die Nachfrage des Veloverkehrs für jedes Zonenpaar. Durch Export und Einlesen jener Nachfrage in das Umlegungsmodell kann die Umlegung auf das Strassennetz erfolgen.

Damit der Veloverkehr berechnet werden kann, wird ein Widerstand benötigt der die verschiedenen Routenalternativen bewertet. Der Widerstand ist in der Regel die benötigte Reisezeit. Im KVM-AG setzt sich der Widerstand aus fünf Teilen zusammen: Die Strecken, die Anbindungen, die Abbieger, die Oberabbieger und die regulierten Verkehrsbereiche.

$$\text{Widerstand Velo} = \sum \text{Anbindungen} + \sum \text{Strecken} + \sum \text{Abbieger} + \sum \text{Oberabbieger} \quad (5)$$

Der Widerstand wird für alle Modi unterschiedlich berechnet. Im Umlegungsmodell kommt es dabei zu keiner Verschiebung der Modalsplits. Jedoch werden Teile, wie die Kenngrössenmatrix Velowiderstand, später wieder ins Nachfragemodell eingelesen wodurch sie über die EVA-Bewertung mit den anderen Modi in Verbindung gebracht werden.

Da die Strecken den mit Abstand grössten Anteil der Reisezeit ausmachen, wird dieser näher betrachtet. Die Reisezeit dient der Berechnung der Umlegung respektive Wegfindung des Veloverkehrs aber auch der Berechnung der Nachfrage und Moduswahl. Das Umlegungsmodell erzeugt die für das Nachfragemodell benötigten Kenngrössenmatrizen.

2.3.1 Velowiderstand

Für die Strecken wird das Attribut *Velowiderstand* verwendet. Es beinhaltet nebst der reinen Reisezeit auch einen Steigungsfaktor f_g , um Zeitverluste in Steigungen abzubilden, sowie einen Faktor zur Berücksichtigung der MIV-Belastung f_{MIV} , um die Attraktivität auf hochbelasteten Streckenabschnitten für den Veloverkehr zu verringern. Der Velowiderstand beinhaltet somit sowohl rein physikalische wie auch wahrnehmungsbasierte Grössen.

$$\text{Velowiderstand} = t_0 \cdot f_g \cdot f_{MIV} \quad (6)$$

Datengrundlage: KVM-AG Ver. 2022, BVU AVK, 2024 und Weis und Vrtic, 2022

- t_0 : Reine Fahrzeit berechnet über $\frac{\text{Streckenlänge}}{\text{Velogeschwindigkeit}}$
- f_g : Steigungsfaktor

- f_{MIV} : Belastungsabhängiger Widerstandsfaktor

Reine Fahrzeit

Die reine Fahrzeit ergibt sich aus der spezifischen Geschwindigkeit sowie der Länge jeder Strecke. Im KVM-AG wird hierbei die Geschwindigkeit über das Formelattribut *Velo-Geschwindigkeit* lokal angepasst (Abb. 3). Die Fahrgeschwindigkeit v_0 fürs Velo beträgt im Ursprungsmodell 12 km/h (BVU AVK, 2024). Der Wert wird gedeckelt, falls die erlaubte Höchstgeschwindigkeit der Strecke kleiner als die Fahrgeschwindigkeit ist. Über den *Velo-Code* wird im Modell die Radverkehrsanlage beschrieben, sofern vorhanden. Hierbei wird, dem Ursprungsmodell zufolge, beim Typ Radstreifen ein Bonus von +2 km/h und bei Radwegen +4 km/h gewährt.

Abbildung 3: Formel zur Bestimmung der Velogeschwindigkeit im KVM-AG

Formel für Attribut 'LINK;VELO_GESCHWINDIGKEIT' bearbeiten

```
IF([VØIV] > 0, MIN(12 + ([VELO_CODE] = 2) * 2 + ([VELO_CODE] = 1) * 4, [VØIV]), 12 + ([VELO_CODE] = 2) * 2 + ([VELO_CODE] = 1) * 4)
```

Quelle: Aus Modell KVM-AG Version 2022, BVU AVK, 2024

Steigungsfaktor

Der Steigungsfaktor beschreibt den zusätzlichen Zeitaufwand, welcher zur Überwindung einer Strecke mit Steigung nötig ist. Hierfür wird das Standardattribut *Steigung* aus PTV Visum verwendet. Es berechnet die Steigung auf einer Strecke, in dem die Höhendifferenz zwischen Von- und Nachknoten errechnet und durch die Streckenlänge dividiert wird (2023). Basierend auf der Steigung wird der Steigungsfaktor f_g berechnet, welcher die reine Streckenfahrzeit t_0 beeinflusst.

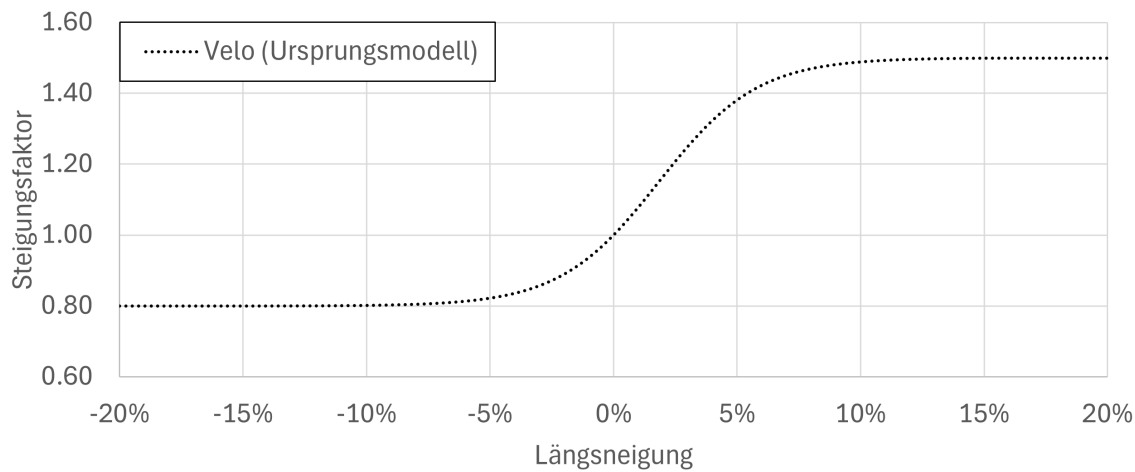
$$f_g = 0.8 + \left((1.5 - 0.8) \cdot \frac{1}{1 + \exp(-0.5 \cdot (\text{Steigung} - \text{Steigung}_B))} \right) \quad (7)$$

- f_g : Steigungsfaktor
- Steigung: Neigung des Fahrstreifens [%] (positiv Steigung, negativ Gefälle) (Visum, 2023)
- Steigung_B : $\frac{\ln(\frac{1.5-1}{1-0.8})}{0.5}$

Datengrundlage: KVM-AG Version 2022, BVU AVK, 2024 und Weis und Vrtic, 2022

Dies ergibt einen individuellen Faktor je Strecke abhängig der Steigung (Abb. 4).

Abbildung 4: Steigungsfaktor im KVM-AG



Datengrundlage: KVM-AG Ver. 2022, BVU AVK, 2024 und Weis und Vrtic, 2022

Belastungsabhängiger Widerstandsfaktor

Die MIV-Belastung wird im Veloverkehr ebenfalls über einen Faktor berücksichtigt. Dieser leitet sich über die MIV-Belastung auf der Strecke ab. Wie bei der Steigung wird die MIV-Belastung jeweils pro Strecke und Richtung ausgegeben und unter einem Streckenattribut abgelegt. Der Faktor wird für alle Streckentypen ausgegeben. Handelt es sich bei der Strecke um einen Radweg, wird der MIV-Faktor nicht berechnet und auf 1 gesetzt.

Der Faktor wird über eine logistische Funktion abgebildet. Durch verschiedene Attribute kann der Verlauf der Funktion eingestellt werden. Dies beinhaltet den maximalen Faktor, *Belastung Max*, sowie Hilfsgrößen, welche den Wendepunkt beschreiben (*Belastung A* und *B*). Zusammen ergibt sich die Funktion zur Beschreibung des MIV-Faktors (Formel 8).

$$f_{MIV} = \text{Belastung Min} + \frac{\text{Belastung Max} - \text{Belastung Min}}{1 + \exp(-\text{Belastung A} \cdot (\text{MIV Belastung} - \text{Belastung B}))} \quad (8)$$

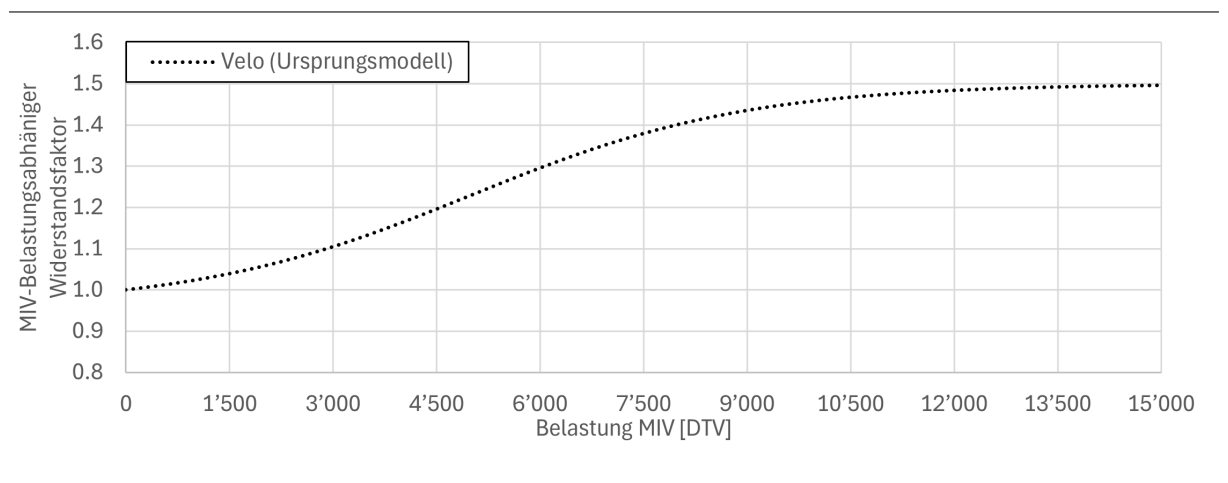
- f_{MIV} : MIV-Belastungsabhängiger Widerstandsfaktor
- MIV Belastung: MIV-Belastung auf der betreffenden Strecke
- Belastung Min: Formel 9
- Belastung Max: 1,5
- Belastung A: 5000
- Belastung B: 0,0005

$$\text{Belastung Min} = \frac{1 - \text{Belastung Max} + \exp(\text{Belastung A} \cdot \text{Belastung B})}{\exp(\text{Belastung A} \cdot \text{Belastung B})} \quad (9)$$

Quelle: KVM-AG Version 2022, BVU AVK, 2024 und Weis und Vrtic, 2022

Der Einfluss des MIV-Faktors berücksichtigt unter anderem, dass eine Strasse mit hoher MIV-Belastung unattraktiver wahrgenommen wird. Dies geschieht direkt über den MIV-Faktor, welcher in die Berechnung des Velowiderstands miteinfließt und die entsprechende Strecke über die Erhöhung der Reisezeit beeinflusst.

Abbildung 5: MIV-Belastungsabhängiger Widerstandsfaktor



Datengrundlage: KVM-AG Version 2022, BVU AVK, 2024 und Weis und Vrtic, 2022

2.3.2 Veloaffinität

In der Modellaktualisierung von 2022 wird ebenfalls eine Affinitätsfaktor für die bessere Abbildung des Velo-Anteils am Modalsplit in den Städten Aarau, Baden, Brugg, Wettingen und Windisch eingepflegt (Weis und Vrtic, 2022). Der Faktor stammt aus einer auf Oberbezirksebene ermittelten Konstanten. Die Konstante wird über eine Formel berechnet und in einer Matrix abgelegt, damit sie in der EVA-Bewertung nach Quell-Zielbeziehung miteinbezogen werden kann (Formel 10).

$$\text{Velo Affinität}_{ij} = \begin{cases} \text{Affinität}_i + \text{Affinität}_j, & \text{wenn } i = j \\ \frac{\text{Affinität}_i + \text{Affinität}_j}{\sqrt{2}}, & \text{wenn } i \neq j \end{cases} \quad (10)$$

Quelle: KVM-AG Version 2022, BVU AVK, 2024 und Weis und Vrtic, 2022

Wobei:

- Affinität_i: Veloaffinität im Startoberbezirk *i* respektive Zieloberbezirk *j*

3 Datengrundlagen und Funktionstests

3.1 Methodik

Um die aktuelle Abbildung des Radverkehrs mit einem radtypenspezifischen Verhaltensmodell zu erweitern, bedarf es einer Anpassung des KVM-AG in mehreren Schritten. Zu Beginn wird der Modus Veloverkehr durch den Einbau eines weiteren Verkehrsmittels, des E-Bikes, differenziert. In einem nächsten Schritt werden die bestehenden Verhaltensparameter des Verkehrsmittels Velo überarbeitet und zusätzliche Verhaltensparameter für das Verkehrsmittel E-Bike gemäss dem aktuellen Wissensstand eingeführt. Viele Wirkungszusammenhänge sind bekannt, jedoch oftmals in ihrer Wirkungsstärke nicht einheitlich definiert. Daher wird sich im ersten Schritt der Erweiterung auf Datengrundlagen gestützt, die auf breiten empirischen Erhebungen beruhen. Darunter namentlich der MZMV sowie diverse Geschwindigkeitsinventare, welche im Nachfragepotential des Veloverkehrs (Eggermond et al. 2024) bereits zusammengetragen und ausgewertet vorliegen.

Die Erweiterungen umfassen Schritte auf Netzebene, wie die Geschwindigkeitsanpassung oder den Steigungswiderstand, und auf Ebene des Nachfragemodells die Affinität zwischen den Raumtypen. Die Kalibrierung der Erweiterungen erfolgt nach dem Einbau. Ziel der Datengrundlagen und Funktionstests ist es, die Machbarkeit der angestrebten Erweiterungen zu prüfen, diese einzubauen und deren Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Ebenfalls werden die benötigten Datengrundlagen eruiert und auf ihre konkrete Tauglichkeit hin untersucht. Ziel ist es, die als geeignet identifizierten Erweiterungen bereit für eine Kalibrierung zu haben. Teil der Untersuchung ist folglich auch das Verwerfen von Erweiterungen, falls sich die Datengrundlage oder die Erweiterung als ungeeignet herausstellt.

Sowohl für den initialen Einbau als auch für die nachfolgende Kalibrierung gilt der Grundsatz, dass die Modellabbildung nur so gut sein kann wie die Datengrundlage, auf der sie basiert. Für eine differenzierte Abbildung des Radverkehrs bedarf es einer Datengrundlage, die zwischen verschiedenen Radtypen unterscheidet und im zu modellierenden Gebiet erhoben wurde. Der Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) erhebt seit 2015 die Radtypen differenziert voneinander (BFS und ARE, 2017). Aufgrund seines Umfangs, der regelmässigen Erhebungsperioden sowie der passenden räumlichen Auflösung wird der MZMV, sofern möglich, als primäre Datengrundlage herangezogen.

Der Datenumfang variiert in Abhängigkeit von der räumlichen Ausdehnung und ist daher unterschiedlich geeignet, da die Anzahl an Beobachtungen begrenzt ist. Wird ein zu kleines geografisches Gebiet gewählt, fällt die Anzahl an Beobachtungen gering aus und der Konfidenzintervall steigt, was die Analyse wenig aussagkräftig macht. Eine detaillierte Einordnung der verwendeten Datengrundlage erfolgt jeweils im betreffenden Abschnitt. Grob können drei Gebiete unterschieden werden. Das Kerngebiet ist der Kanton Aargau. Das Modellgebiet ist dabei das Kerngebiet sowie alle anderen vom Modell abgedeckten Gebiete. Diese lassen sich wiederum in innerhalb und ausserhalb der Schweiz aufteilen (Abb. 1). Beim MZMV stehen die

Daten nur für Auswertungen innerhalb der Schweiz zur Verfügung. Innerhalb eines Gebietes bedeutet, dass sich sowohl Start- als auch Zielpunkt der beobachteten Wege innerhalb des Gebietes befinden. Bei Auswertungen, bei denen der Wohnstandort ausschlaggebend ist, wird entsprechend nur der Wohnstandort innerhalb des Gebietes betrachtet.

Um die Auswirkungen der Anpassungen im Modell quantifizierbar und vergleichbar zu machen, wird bei der Distanzverteilung das Bestimmtheitsmass R^2 herangezogen. Da die Berechnung der Übereinstimmung von Modell und Beobachtung bei der Distanzverteilung auf unterschiedlich grossen Fallzahlen basiert, wird ein gewichtetes Bestimmtheitsmass verwendet (Formel 11). Dies soll sicherstellen, dass die Regressionskurve des Modells mit der Anzahl an Beobachtungen gewichtet wird, sodass die Kalibrierung aufgrund der Genauigkeit an den wichtigsten Stellen erfolgt, anstatt über die gesamte Ausdehnung. Das Bestimmtheitsmass wird in den nachfolgenden Abbildungen jeweils mitgeliefert, sofern die Auswertung dies zulässt.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_w)^2} \quad (11)$$

wobei

$$\bar{y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

- R^2 : Bestimmtheitsmass
- y_i : Beobachteter Wert (beispielsweise aus dem MZMV)
- \hat{y}_i : Vom KVM-AG vorhergesagter Wert
- w_i : Gewichtung der Beobachtung
- \bar{y}_w : Gewichteter Mittelwert der beobachteten Werte
- i : Index für die Beobachtung
- n : Anzahl an Beobachtungen

Quellen: Minitab, 2025 und SebStDD, 2020

3.2 Differenzierung der Radtypen

Um den Radverkehr mit einem radtypenspezifisches Verhaltensmodell zu erweitern, ist zunächst eine Unterscheidung verschiedener Radtypen erforderlich. Im bestehendem Modell ist der Radverkehr alleine über das Verkehrsmittel Velo abgebildet. Aufgrund der unterschiedlichen Verhaltensmuster wird der Radverkehr um den Modus E-Bike erweitert. Für eine weitere Differenzierung in andere Radkategorien ist weder die Datengrundlage noch eine Indikation weiterer Aussagefähigkeit für das Modell gegeben. Das S-Pedelec, welches nochmals durch

die höhere Fahrgeschwindigkeit andere Distanzen erschliesst, wird aufgrund ihrer geringen Beobachtungszahl bei der Auswertung der Kategorie E-Bike zugeordnet.

Die Grundlage für die Entscheidung einer Erweiterung um den Modus E-Bike stammt aus dem zuvor durchgeführten Vertiefungsprojekt (Fiabane, 2025). Hierbei wurden die Datengrundlagen, Verbreitungsentwicklung und weitere Faktoren berücksichtigt. Insbesondere die Unterschiede in den beobachteten Fahrgeschwindigkeiten haben zur Erweiterungsempfehlung beigetragen. Ebenso konnte bei Begehungen in Aarau, Baden und Brugg keine homogenisierenden Effekte beim Velo und E-Bike beobachtet werden, welche die Geschwindigkeiten vereinheitlichen würden. Dieses existiert hingegen beim MIV insbesondere im Kolonnenverkehr, wo das Erreichen der individuellen Höchstgeschwindigkeit nicht möglich ist. Aus diesem Grund erscheint die differenzierte Abbildung im Modell als notwendig.

Jede Erweiterung um einen Modus hat zur Folge, dass alle Modellbereiche, welche mit dem Modi in Kontakt kommen, angepasst werden müssen. Am deutlichsten wird dies beim Modalsplit, welcher im Analysemodell starr vorgegeben werden muss. Als passendes Vorgehen erweist sich das duplizieren eines verwandten Modus (mit all seinen Eigenschaften) und danach ein stufenweises Anpassen der einzelnen Bereiche.

Im vorliegenden Fall der Differenzierung der Radtypen bezieht sich die Duplizierung auf die Kopie des Modus Velos. Im Laufe der Erweiterung werden die dabei kopierten Eigenschaften schrittweise angepasst.

3.3 Modalsplit

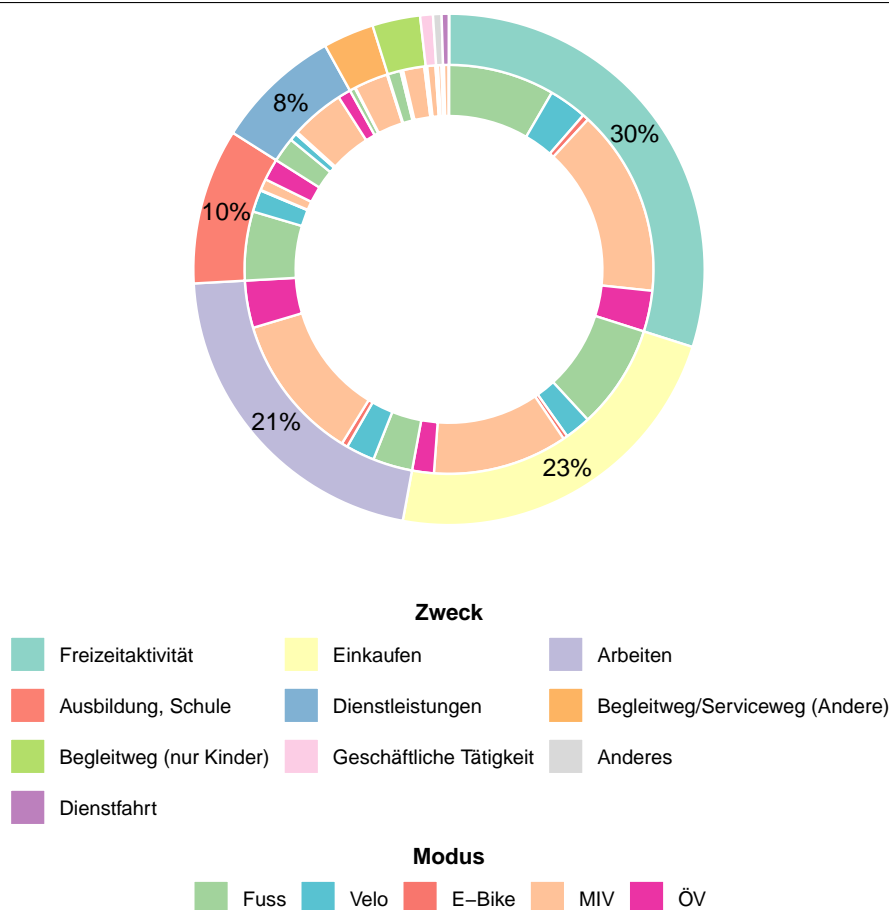
3.3.1 Datengrundlage

Die Erweiterung um einen Modus erfordert eine Anpassung des Modalsplits. Dieser wird im Analysefall starr vorgegeben, und stellt somit einen zentralen Teil des Modells dar. Für jeden Fahrzweck (Nachfrageschicht) wird ein Modalsplit benötigt. Für die Erweiterung wird hierfür der Datensatz des MZMV von 2021 herangezogen. Für die Auswertung werden ausschliesslich Wege berücksichtigt, deren Start und Ziel innerhalb des vom KVM-AG tangierten, inländischen Gebietes liegen. Dies soll sicherstellen, dass möglichst die lokalen und vom Modell abgebildeten Gegebenheiten in die Modellerweiterung einfließen. Eine Beschränkung nur auf den Kanton Aargau ist aufgrund der Datenlage nicht möglich, da für fahrzweckspezifische Analysen zu wenige Beobachtungen vorliegen. Zudem ist der Aargau in mehreren Bereichen eng mit angrenzenden Regionen verknüpft, sodass eine isolierte Betrachtung von vornherein nicht sinnvoll wäre. Das Auswertungsgebiet umfasst daher nebst dem Kanton Aargau auch die Regionen Basel und Teile der Kantone Zürich, Luzern und Solothurn. Die Abgrenzung erfolgt dabei über die vom Modell abgedeckten inländischen Gebieten (siehe Abb. 1).

Die Nachfrageschichten respektive Wegzwecke können ebenfalls dem MZMV entnommen werden. In diesem werden die Fahrzwecke bereits erhoben und kategorisiert. Das Verkehrsmodell

benötigt Modalsplits, die nach Nachfrageschichten differenziert sind. Diesen stimmen jedoch nicht in allen Fällen mit jenen im MZMV definierten Kategorien überein. Aufgrund der Fallzahlen werden nur jene Fahrzwecke berücksichtigt, welche eine genügende Anzahl an Beobachtungen besitzen. Der genaue Grenzwert wird je nach Auswertungsziel im jeweiligen Abschnitt definiert. Dabei wird insbesondere die Anzahl an Beobachtungen im Radverkehr als Entscheidungskriterium herangezogen. Ist der Radverkehrsanteil kaum vorhanden oder ist die Anzahl an Beobachtungen zu gering, wird dieser Fahrzweck nicht betrachtet, da er für die Modellierung des Radverkehrs entweder nicht relevant ist oder zu grosse Unsicherheiten enthält. Dabei ist der Aufwand zur Implementierung gegenüber potenziellen Nutzen zu gering. Die Auswertung des MZMV für das Jahr 2021 (BFS und ARE, 2023) für das abgedeckte inländische Modellgebiet ergibt, dass die fünf Fahrzwecke Freizeit, Einkaufen, Arbeiten, Ausbildung und Dienstleistungen 92 % aller Beobachtungen ausmachen (siehe Abb. 6).

Abbildung 6: Verteilung der Beobachtungen des MZMV im Modellgebiet KVM-AG



Datengrundlage: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

Tabelle 1: Anzahl im MZMV verfügbare Beobachtungen (Wege) im Modellgebiet nach Modus

Fahrzweck	Total [%]	Total [n]	Fuss [n]	Velo [n]	E-Bike	MIV [n]	ÖV [n]
Freizeitaktivität	29,9	9359	2625	944	154	4624	1012
Einkaufen	23,0	7194	2575	642	107	3332	538
Arbeiten	21,2	6642	979	711	150	3634	1168
Ausbildung	9,8	3081	1704	544	15	284	534
Dienstleistung	8,0	2497	613	186	56	1323	319
Begleitweg...							
... Andere	3,2	1006	134	18	0	832	22
... nur Kinder	3,0	946	317	48	19	522	40
Geschäftlich	0,8	253	14	12	8	200	19
Dienstfahrt	0,5	145	4	14	3	117	7
Anderes	0,6	169	40	4	1	83	41

Datengrundlage: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

3.3.2 Aufbereitung und Implementierung

Da der Fokus der Arbeit auf der Erweiterung und Verbesserung des Radverkehrs liegt, wird ein pragmatisches Vorgehen bei dessen Integration gewählt. Der Modalsplit des Radverkehrs wird direkt aus dem MZMV entnommen. Die restlichen Modi werden nicht direkt angepasst. Die Veränderung im Radverkehr wird anschliessend basierend auf den relativen Veränderungen der anderen Modi zwischen 2015 nach 2021 umverteilt. Dabei dient die relative Veränderung der Erhebungen als Grundlage für die Gewichtung, mit der die Differenz zwischen MZMV und KVM-AG bereinigt wird. Dadurch bleiben ursprünglichen Modalsplits grösstenteils erhalten. Der Radverkehrsanteil wird jedoch nach dem MZMV aus dem Jahre 2021 abgebildet. Dadurch wird die spätere Kalibrierung erleichtert, die sich ebenfalls auf die Fahrradanteile von 2021 stützt. Der Radverkehrsanteil wird anschliessend nach den beobachteten Anteilen in Velo und E-Bike aufgeteilt. Dies erfolgt für alle identifizierten Fahrzwecke (Abb. 7). Eine direkte Implementierung des Modalsplits für alle Nachfragesegemente war nicht möglich, da sich die Kategorisierung des MZMV von jener im Modell unterscheidet. Nicht jeder Fahrzweck konnte einer Nachfrageschicht zugeordnet werden, daher wird ein pragmatisches Vorgehen bei den nicht zuordenbaren Schichten gewählt.

Abbildung 7: Übersicht Einbaumethodik Modalsplit

Fahrzweck (MZMV)	Nachfrageschicht (KVM-AG)	Methodik
Arbeiten	01_WA Wohnen-Arbeit	Beob. Radanteil + Umverteilung aus Diff. 2015 zu 2021
Keine	02_WBS Wohnen-Bildung Schule	Unverändert, kein E-Bike
Ausbildung, Schule	03_WBU Wohnen-Bildung Uni	Beob. Radanteil + Umverteilung aus Diff. 2015 zu 2021
Einkaufen	04_WEK Wohnen-Einkauf kurz	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Einkaufen	05_WEL Wohnen-Einkauf lang	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Dienstleistungen	06_WN Wohnen-Nutzfahrt	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Keine	07_WBBH Wohnen-Begleiten	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über E-Bike-Mittelwert
Freizeitaktivität	08_WFk Wohnen-Freizeit kurz	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Freizeitaktivität	09_WFL Wohnen-Freizeit lang	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Keine	23_ES Einkauf-Sonstiges	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	25_NS Nutzfahrt-Sonstiges	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	27_SS Freizeit/Sonstiges-Sonstiges/Freizeit	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	28_DECHWA DE Wohnen-CH Arbeit	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	29_CHDEWE CH Wohnen-DE Einkauf	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	30_CHDEWF CH Wohnen-DE Freizeit	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert

Vice versa für die Gegenrichtung

Datengrundlage:

Nachfrageschichten aus dem KVM-AG, Version 2022 (BVU AVK, 2024)

Die wichtigsten Nachfrageschichten werden wie folgt aufgelöst. Für die Nachfrageschicht *Wohnen - Arbeit* wird der Fahrzweck *Arbeiten* und für *Wohnen - Bildung Uni* wird der Fahrzweck *Ausbildung* verwendet. Dabei wird die tatsächliche Grösse des Radverkehrsanteil verwendet und eingebaut.

Bei der Nachfrageschicht «Wohnen - Bildung Schule» wird die Annahme getroffen, dass für die Schule in der Regel kein E-Bike zur Verfügung steht, basierend auf dem geltenden Mindestalter von 14 Jahren (VZV, Art. 6 Abs. 1). Daher wird der Radanteil belassen und für das E-Bike kein Anteil eingeführt. Für die restlichen Nachfrageschichten, für welche vergleichbare Fahrzwecke vorliegen, werden die jeweiligen Fahrzwecke zugeordnet und der Anteil Radverkehr jeweils aufgrund der Differenz von 2015 zu 2021 angepasst. Der Einbau des E-Bikes erfolgt fahrzweckspezifisch und wird über den relativen Anteil am Radverkehr eingebaut.

In Fällen, in denen kein Fahrzweck vorhanden ist, wird der im Modell vorhandene Radverkehr über einen gewichteten Mittelwert in die Modi Velo und E-Bike aufgeteilt.

3.4 Netzmodell

Für die Erweiterung des Modells um ein radtypenspezifisches Verhaltensmodell wird ebenfalls eine Erweiterung und Anpassung des Netzmodells nötig. Das Netzmodell umfasst sämtliche Strecken und Knoten sowie die damit assoziierten Attribute. Im Rahmen eines Einbaus des neuen Verkehrsmodus E-Bike werden die zuvor gespiegelten Attribute Streckengeschwindigkeit-

keit und Steigungsfaktor entsprechend angepasst. Im gleichen Zug werden die Attribute des Velos aktualisiert, sodass beide Modi auf den gleichen Datengrundlagen beruhen. Bei der Duplizierung übernommene Eigenschaften, welche hier nicht näher beschrieben werden, gilt, dass diese vom Velo übernommen und nicht angepasst werden. Dazu zählt insbesondere die Befahrbarkeit der Infrastruktur. Im Modell existieren zudem nur drei Führungsformen von Radverkehr: Mischverkehr, Radstreifen und Radwege. Für diese Führungsformen existieren dieselben Vorschriften für Velos und E-Bikes. Dadurch erübrigt sich eine aufwändige Überarbeitung des Netzmodells.

3.4.1 Streckengeschwindigkeit

Eine Auswertung der Fahrt ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeit aus dem MZMV zeigt auf, dass das Velo 12,8 km/h, das E-Bike 14,6 km/h und S-Pedelec 20,9 km/h schnell ist (BFS und ARE, 2023). Im Kanton Aargau liegt diese bei 12,6 km/h, 14,3 km/h und 19,6 km/h (BVU AVK, 2023). Daher liegt die tatsächliche Streckengeschwindigkeit wohl höher als jene im Modell mit 12 km/h für Velos (BVU AVK, 2024). Da in den MZMV-Daten auch die Standzeit an Knoten, wie Kreuzungen und Lichtsignalanlagen, inbegriffen sind, eignet sich eine Implementierung dieser Geschwindigkeiten nur bedingt für die Streckengeschwindigkeiten im Modell. Der Zeitaufwand zur Überwindung von Knoten wird bereits explizit im Modell abgebildet und würde durch die Verwendung dieser Geschwindigkeit als v_0 doppelt berücksichtigt. Zudem scheinen die Reisezeiten aus dem Datensatz des MZMV gerundet zu sein, weshalb folglich wenn möglich die Reisedistanzen verwendet werden.

Aufgrund dieser Erkenntnis wird die Streckengeschwindigkeit basierend auf dem Forschungsbericht «Nachfragepotentiale des Veloverkehrs» (Eggermond et al. 2024) angepasst. Dabei handelt es sich um einen Vorabzug und nicht um die definitive Fassung des Berichtes. Der Forschungsbericht untersucht und erstellt unter anderem ein Geschwindigkeitsinventar, welches mehrere Studien zur Geschwindigkeit unterschiedlicher Radtypen zusammenfasst. Im Vorabzug des Berichts wird explizit die Streckengeschwindigkeit, durch Auswertung und Zusammenstellung von diversen Studien, erfasst. Dabei liegt die durchschnittliche, von Knoten unbeeinflusste, freie Streckengeschwindigkeit beim Velo bei 21 km/h und beim E-Bike 22,5 km/h (Eggermond et al. 2024) für innerorts Strecken.

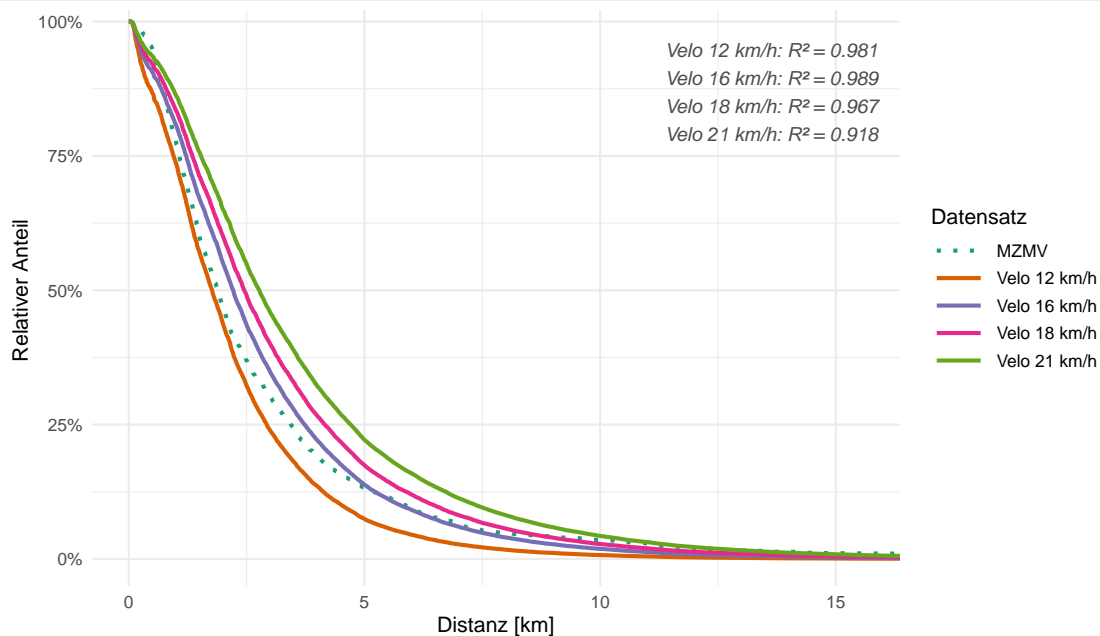
Tabelle 2: Geschwindigkeitsinventar für den Radverkehr im KVM-AG

Quelle	Velo [km/h]	E-Bike [km/h]
MZMV von 2021 gesamte Schweiz (BFS und ARE, 2023)	12,8	14,6
MZMV von 2021 nur Kt. Aargau (BVU AVK, 2023)	12,6	14,3
Nachfragepotentiale des Veloverkehrs (Eggermond et al. 2024)	21,0	22,5
Modell KVM-AG, Version 2022 (BVU AVK, 2024)	12,0	-

Ein Hinweis für eine abweichende Streckengeschwindigkeit für Radstreifen konnte nicht ausgemacht werden (Eggermond et al. 2024). Zudem kommt die Überlegung, dass im vorhandenen Modell eine unbelastete Quartierstrasse im Mischverkehr unattraktiver ist, als ein Radstreifen auf einer belasteten Strasse. Der Geschwindigkeitsvorteil von +2 km/h macht einen Radstreifen bis zu einer Belastung von 4'000 MIV attraktiver als eine unbelastete Strasse ohne Radstreifen. Aufgrund dieser Überlegungen wird im Modell der Geschwindigkeitszuschlag für Radstreifen entfernt. Für breite Radwege (> 3,0 m) wird laut Bericht ein Bonus von 2 km/h gewährt (Eggermond et al. 2024). Da im KVM-AG die Breite der Verkehrswege nicht vorhanden ist, könnte als Kompromiss der existierende Zuschlag von 4 km/h auf 2 km/h herabgesetzt werden. Dies unter der Annahme, dass trotz der fehlenden Breitenangabe in der Regel Radwege unterbruchsfreier sind als gewöhnliche Strecken. Dieser Geschwindigkeitsvorteil soll im Modell weiterhin erhalten bleiben.

Bei einem ersten Einbau der Geschwindigkeit aufgrund der Datengrundlage stellt sich heraus, dass diese zu zu hohen Distanzverteilungen führt (Abb. 8). Die Findung der definitiven Streckengeschwindigkeit erfolgt durch Versuchsweisen Einbau von verschiedenen Geschwindigkeiten in das Modell. Anschliessend wird mittels des R^2 derjenige Wert gewählt, welcher am nächsten an die beobachtete Distanzverteilung des MZMV kommt. Der Einbau ergibt hierbei eine neue Streckengeschwindigkeit des Velos von 16 km/h. Dies ist stellt dabei ein Kompromiss zwischen beobachteter Streckengeschwindigkeit und jener fürs Modell dar.

Abbildung 8: Einbau und Reaktion unterschiedlicher Velo-Geschwindigkeiten im KVM-AG auf die Distanzverteilung



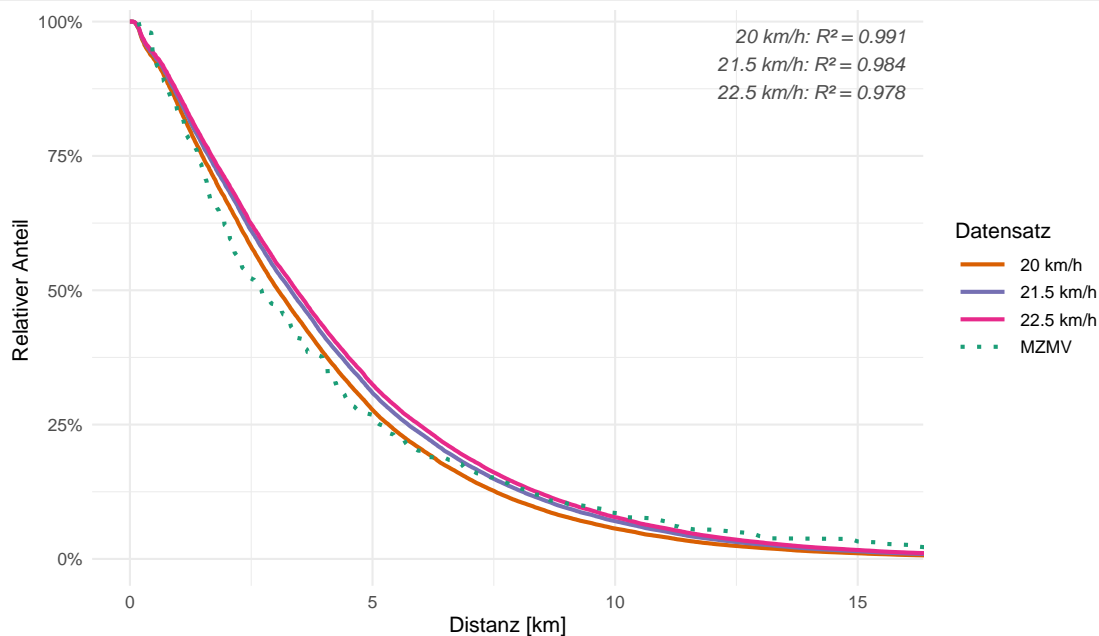
Datengrundlage:

MZMV: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

KVM-AG: Modifiziertes KVM-AG Version 2022 (BVU AVK, 2024)

Das Gleiche wird für den neuen Modus E-Bike getan (Abb. 9). Da hier keine Ausgangsgröße im Modell existiert, wird mit dem Wert 22,5 km/h gestartet und über die Auswertung der Distanzverteilung das optimale Verhältnis gesucht.

Abbildung 9: Einbau und Reaktion unterschiedlicher E-Bike-Geschwindigkeiten im KVM-AG auf die Distanzverteilung



Datengrundlage:

MZMV: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

KVM-AG: Modifiziertes KVM-AG Version 2022 (BVU AVK, 2024)

Für das KVM-AG werden aufgrund der Übereinstimmung mit der Distanzverteilung aus dem MZMV (BFS und ARE, 2023) 16 km/h für das Velo und 20 km/h für das E-Bikes als geeigneter Wert festgelegt. Die tiefere Geschwindigkeit wird durch die Annahme begründet, dass die Knotenwiderstände zwar separat abgebildet sind, jedoch nicht das explizite verlangsamen in Kreuzungsbereichen und an Knoten ohne Zuschlag, sprich Zeitaufwand.

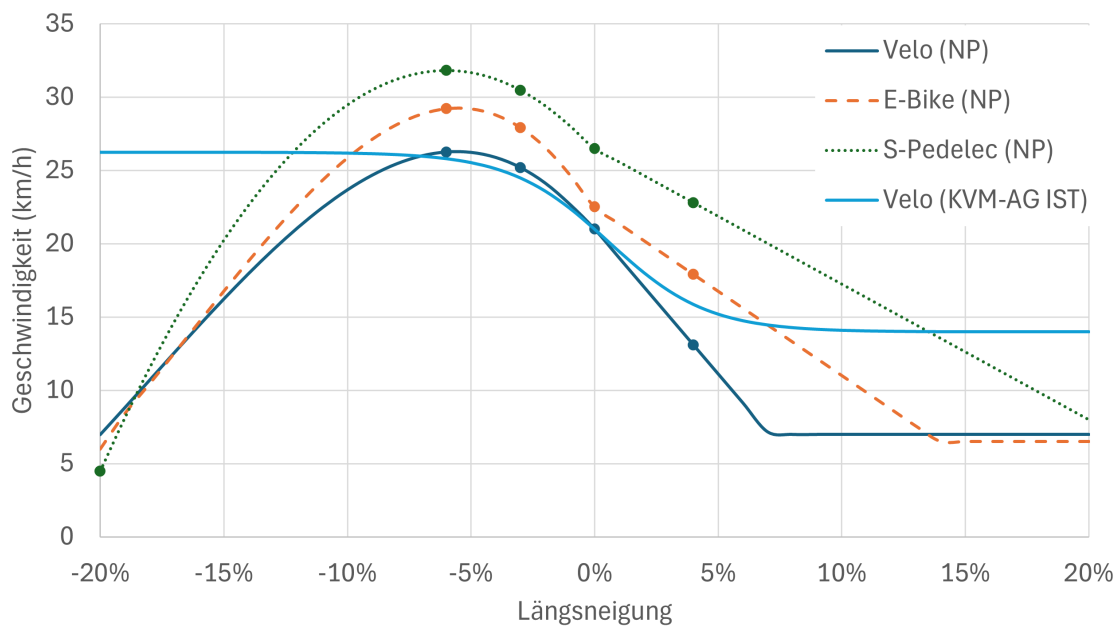
Theoretisch können im Modell auch die Widerstandsfaktoren für die Reisezeit angepasst werden, um die höhere Geschwindigkeit zu kompensieren. Der Reisezeitwiderstand wird für jede Nachfrageschicht einzeln bestimmt. Jedoch fehlt es an genügend Beobachtungen im Gebiet des KVM-AG, welche eine genaue Kalibrierung aller Reisezeitwiderstände erlauben würde. Aus diesem Grund wird bei der ersten Implementierung auf eine Anpassung der Widerstände verzichtet. Einzelne Anpassungen erfolgen in der Kalibrierung.

3.4.2 Steigungswiderstandsfaktor

Für die Differenzierung nach Radtypen muss die Steigungsfunktion differenziert und angepasst werden. Im Rahmen der Erweiterung um den Widerstand für E-Bikes wird der Velo-Steigungswiderstand ebenfalls überarbeiten und nach dem aktuellen Kenntnisstand angepasst.

Der Steigungswiderstand stützt sich auf den Forschungsbericht «Nachfragepotentiale des Veloverkehrs» (Eggermond et al. 2024). In diesem wird basierend auf Studien zu beobachteten Geschwindigkeiten in Steigungen eine radtypenspezifische Geschwindigkeitsfunktion vorgeschlagen.

Abbildung 10: Geschwindigkeiten in Steigungen in Nachfragepotentiale des Veloverkehrs (NP) und KVM-AG (Steigungsfaktoren übersetzt in Geschwindigkeit zur Vergleichbarkeit mit NP)



Datengrundlage:

Velo (NP), E-Bike (NP) und S-Pedelec (NP):

Nachfragepotentiale des Veloverkehrs (Entwurf), Eggermond et al. 2024

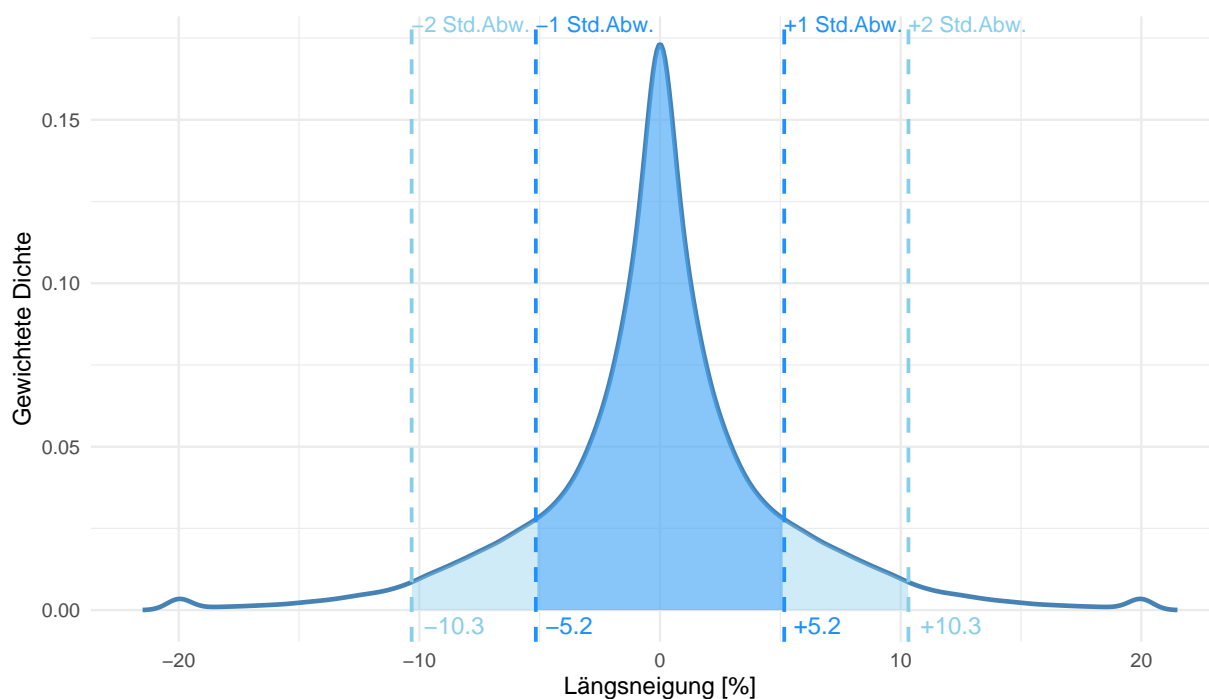
Velo (KVM-AG IST): KVM-AG, Version 2022, BVU AVK, 2024

Übrige: Eigene Anpassung basierend auf dem Ursprungsmodell von BVU AVK, 2024

Die Geschwindigkeitsfunktion wird als Grundlage verwendet und darauf basierend der Steigungswiderstand abgeleitet. Hierfür wird der existierende Steigungsfaktor f_g verwendet, welcher den reinen Zeitverlust/-gewinn durch die Geschwindigkeitsveränderung in Steigungen beschreibt. Dieser wird direkt über die Geschwindigkeitsfunktion gewonnen.

Der Fokus beim Einbau eines neuen Steigungsfaktors liegt auf den am häufigsten vorkommenden Steigungen. Im vorliegenden Modell besitzen 95% aller Strecken eine Steigung zwischen $\pm 10,3\%$. Die ausserhalb liegenden Steigungen werden daher nicht prioritär betrachtet.

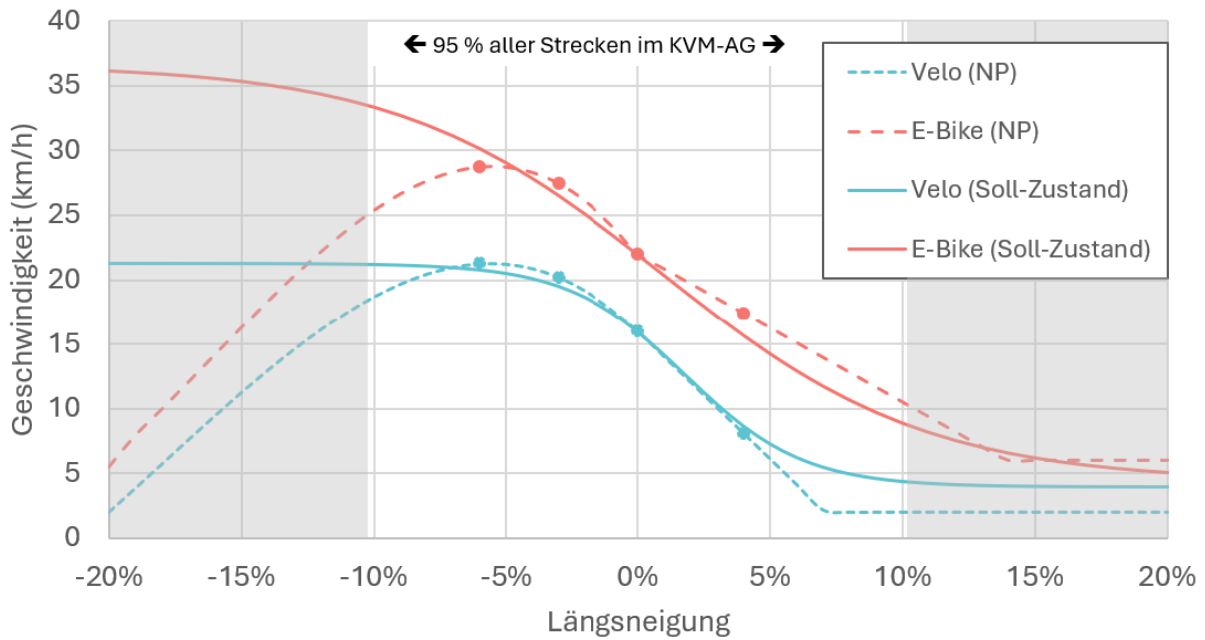
Abbildung 11: Verteilung der Längsneigungen im KVM-AG



Quelle: Auswertung des Netzmodells des KVM-AG Ver. 2022 (BVU AVK, 2024)

Basierend auf der spezifischen Geschwindigkeit je Strassenneigung, welche im Nachfragepotentiale des Veloverkehrs beschrieben ist, wird die Steigungsfunktion im Modell angepasst. Beim Einbau wird, wie im Ursprungsmodell, eine logistische Funktion verwendet. Auf eine Verwendung einer komplexeren oder unterteilten Funktion wird an dieser Stelle verzichtet, da der Nutzen einer genaueren Abbildung als gering eingeschätzt wird (95% aller Strecken eine Steigung zwischen $\pm 10,3\%$).

Abbildung 12: Vorschlag Erweiterung Steigungsgeschwindigkeit (Steigungsfaktoren übersetzt in Geschwindigkeit zur Vergleichbarkeit mit NP)



Datengrundlage:

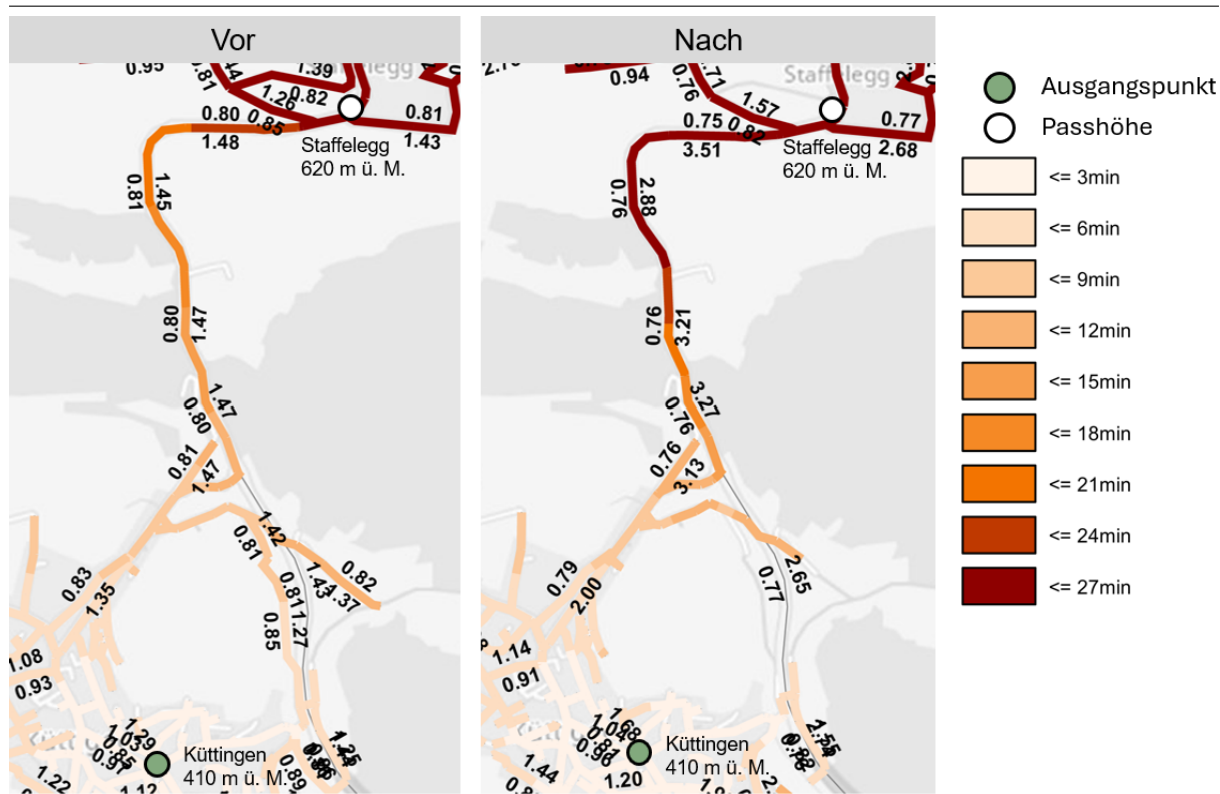
Velo (NP) und E-Bike (NP): Nachfragepotentiale des Veloverkehrs, Eggermond et al. 2024

Velo (KVM-AG IST): KVM-AG, Version 2022, BVU AVK, 2024

Übrige: Eigene Anpassung basierend auf dem Ursprungsmodell von BVU AVK, 2024

Durch die Verwendung der Isochronen können die Auswirkungen der neuen Steigungsfaktoren sichtbar gemacht und auf ihre Funktionsweise überprüft werden. Als Beispiel wird ein Abschnitt des Passes Staffelegg herangezogen. Ausgangspunkt für die Reisezeitberechnung der Isochronen ist das Dorf Küttigen.

Abbildung 13: Reisezeitisochronen vor (links) und nach (rechts) Anpassung Steigungsfaktor



Datengrundlage: Modell KVM-AG, Version 2022 (modifiziert)

Wie auf den Kartenausschnitten (Abb. 13) zu sehen ist, erhöht sich die Velo-Reisezeit bergauf in Richtung Passhöhe Staffelegg. Dies deckt sich mit der Anpassung der Steigungsfunktion, welche in Steigungen einen höheren Faktor, sprich längere Reisezeit aufgrund geringerer Geschwindigkeit, erzeugt (vgl. 12, blaue und graue Linie). Bergab hingegen sind die Steigungsfaktoren leicht tiefer als bisher, was sich ebenfalls mit der Anpassung deckt. Der erfolgreiche Einbau und Anpassung der Geschwindigkeit sowie Steigungsfaktor werden nachfolgend für die weiteren Anpassungen und die Kalibrierungen als «Referenz» verwendet, da im ursprünglichen Modell das E-Bike fehlt.

3.4.3 Streckenspezifischer Wahrnehmungsfaktor

Im vorhandenen Modell ist ein Widerstandsfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses der MIV-Belastung auf den Veloverkehr gegeben. Der Widerstand erhöht sich mit zunehmender MIV-Belastung, wird jedoch unabhängig der Geschwindigkeit des MIV oder der Führungsform, mit Ausnahme der Radwege, ausgegeben. Aus Überlegungen der Umstände im Strassenverkehr müsste die Infrastruktur zusammen mit der MIV-Belastung und der Geschwindigkeitsdifferenz

gekoppelt sein. Dies würde ebenfalls den Einbau weiterer Radtypen erleichtern, da die Geschwindigkeitsdifferenz unabhängig des Radtyps funktioniert. Zur sprachlichen Vereinfachung wird der Faktor nachfolgend Streckenwahrnehmungsfaktor f_s genannt.

Diverse Auswertung zum Routenwahlverhalten des Radverkehrs zeigen, dass die genannten Faktoren in der Tat einen Einfluss haben. Es lässt sich jedoch aus den vorhandenen Studien keine direkt anwendbare und realistische Modellbeschreibung ableiten. Denn die Studien untersuchen meist nur Teilaspekte, und ihre Ergebnisse sind wegen methodischer Unterschiede nur eingeschränkt übertragbar. Daher sind feste Wirkungsgrösse zur Verwendung als Widerstand im Modell nicht vorhanden.

Ebenso können die Auswirkungen und folglich die Richtigkeit der Erweiterung im Umlegungsmodell nicht validiert werden, da ein dichtes flächendeckendes Zählstellennetz fehlt. Ein Einbau wäre nur mit «Fingerspitzengefühl» möglich. Daher wird der Einbau respektive die Aktivierung der folgend beschriebenen Erweiterung vorerst aufgeschoben und erst nach einer erfolgreichen Validierung und Kalibrierung der anderen Modellerweiterungen erfolgen. Der Grund hierfür ist die fehlende Datengrundlage, welche jegliche Aussagen zu Belastungsdifferenzen im Netz, respektive Umlegungsmodell, verunmöglichen. Folglich sind die Grössenordnungen der Faktoren und die daraus resultierenden Verschiebungen im Netz mit Vorsicht zu betrachten. Sie basieren auf keiner robusten Datengrundlage und leiten sich letztlich aus hypothetischen Überlegungen des Radverkehrsverhaltens ab.

Die Grundüberlegung stammt aus Planungsgrundsätzen der Norm (vgl. VSS, 2025) und Handbücher (vgl. Bern, 2023). Die Entscheidung für den testweisen Einbau trotz mangelnder Datengrundlage stammt aus der Überlegung, dass das Umlegungsmodell in der Lage sein soll, eine gewisse Differenzierung der Strecken zu kennen ohne zugleich das Nachfragemodell zu verzerren.

Die Bedingung für eine Anpassung des existierenden Faktors, nachfolgend Komfortfaktor, sind, dass das Umlegungsmodell durch die Erweiterung nicht zusätzliche Arbeitsschritte erfordert. Insbesondere in Hinsicht auf die Pflege und Weiterentwicklung des Modells soll der Faktor flexibel einsetzbar und erweiterbar sein. Der existierende Faktor wird daher beibehalten und die Formel inhaltlich differenziert. Die Formel verwendet die Attribute Geschwindigkeit, MIV-Belastung sowie die Art der Radverkehrsanlage (Velo Code). Eine direkte Studie zum Einfluss dieser Faktoren konnte nicht gefunden werden. Es existieren jedoch verschiedene Studien die Teile davon untersuchen. Der Faktor leitet sich folglich aus den Erkenntnissen von verschiedenen Untersuchungen ab, welche belegen, dass die Infrastrukturart, die MIV-Belastung und die MIV-Geschwindigkeit einen Einfluss auf die wahrgenommene Reisedistanz im Radverkehr haben (vgl. Meyer de Freitas und Axhausen, 2023; Meister et al. 2022; Broach, Gliebe und Dill, 2010).

Der Einbau leitet sich aus einer logischen Überlegung ab, ist folglich nicht direkt aus einer empirische Studie sondern aus der Verknüpfung der Erkenntnisse mehrere Studien entstanden.

Als Einbau wird auf die Geschwindigkeitsdifferenz (ΔV) zwischen fahrenden MIV und fahrendem Radverkehr gesetzt. Je grösser die Differenz und die MIV-Belastung, desto unattraktiver soll eine Strecke wahrgenommen werden. Die Transformation wird wie in der Vorlage (Formel 8) durch eine logistische Funktion ausgegeben. Die neue Formel baut auf der existierenden Formel auf und nutzt dieselben Attribute wie die MIV-Belastung, die erlaubte Höchstgeschwindigkeit sowie der Radinfrastrukturtyp (Formel 12). Die MIV-Belastung richtet sich nach der Anzahl Fahrzeuge pro Tag. Hierbei werden explizit Fahrzeuge gezählt, da für den Radverkehr unwesentlich ist, wie viele Personen sich in dem Fahrzeug befinden.

$$f_s = \begin{cases} 0,88 \text{ wenn Radweg (Beispiel Velo)} \\ 1,00 \text{ wenn } V_{0,IV} = 0 \text{ km/h oder } V_{0,IV} = V_{0,Rad} \\ \text{Belastung Min} + \frac{\text{Belastung Max} - \text{Belastung Min}}{1 + \exp\left(-\text{Belastung A} \cdot \left(\text{MIV Belastung} - \frac{\text{Belastung B}}{\Delta V}\right)\right)} \end{cases} \quad (12)$$

wobei gilt

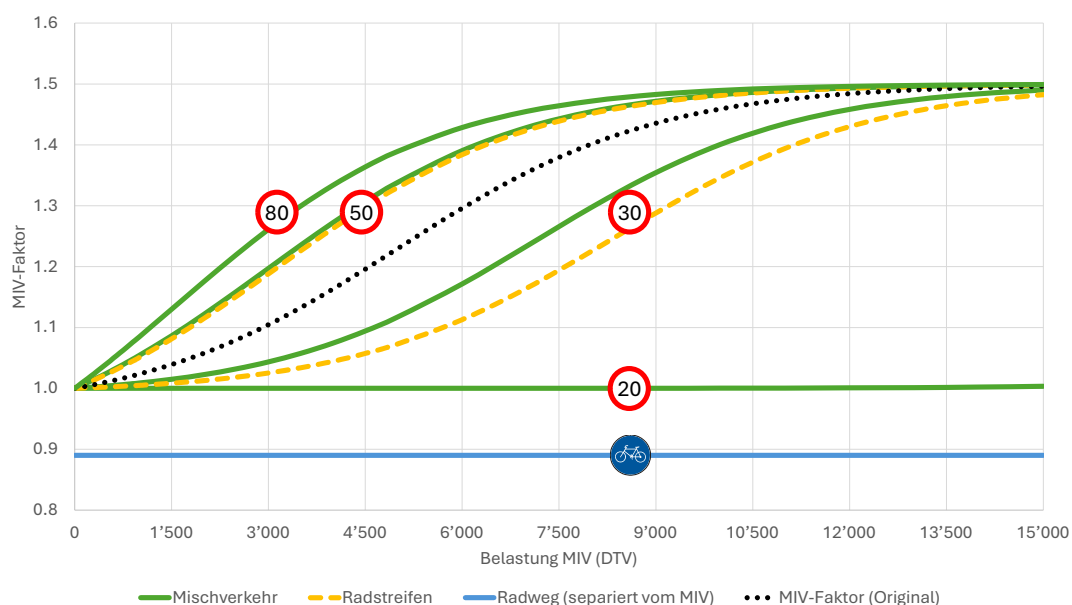
$$\Delta V = \max(|V_{0,IV} - (V_{0,Rad} + \delta)|, 1)$$

- f_s : Streckenspezifischer Wahrnehmungsfaktor
- $V_{0,IV}$: zulässige Höchstgeschwindigkeit der Infrastruktur
- $V_{0,Rad}$: Grundgeschwindigkeit des betreffenden Radverkehrs
- δ : Zusätzlicher Bonus bei Sicherheitsabstand (z. B. breiter Radstreifen $\delta = 2 \text{ km/h}$)
- ΔV : Geschwindigkeitsdifferenz MIV zu Radverkehr
- Belastung Min, Belastung Max: kalibrierte Minimal- bzw. Maximalwerte des Widerstands
- Belastung A: Steilheitsparameter A der logistischen Funktion
- Belastung B: Steilheitsparameter B der logistischen Funktion
- MIV Belastung: Motorisierte Individualverkehrsbelastung [Anz. Fahrzeuge pro Tag]

Die ungefähre Grössenordnung für den Einbau basiert auf verschiedenen Grundlagen. Die Weiterentwicklung soll die neuesten Entwicklungen in der Normierung berücksichtigen und somit den Stand der Technik abbilden. In der Literatur werden bereits Infrastrukturtypen nach MIV-Belastung und Geschwindigkeit kategorisiert. Diese Informationen stammen aus der Vernehmlassung der VSS-Norm 640 060 zum Veloverkehr (vgl. VSS, 2025, Stand 11.03.2025) sowie aus dem bereits länger in Gebrauch befindlichen Masterplan Veloinfrastruktur der Stadt Bern (2023).

Jene Empfehlung wird als Anhaltspunkt genommen und darauf basierend ein Entwurf zur Differenzierung des Streckenwahrnehmungsfaktors erstellt. Der Faktor wird kontinuierlich gestaltet. So kann sichergestellt werden, dass alle Geschwindigkeiten und MIV-Belastungen abgebildet werden können, ohne eine neue Kategorie einführen zu müssen. Kategorisch verbleiben die Führungsformen, welche bereits im KVM-AG vorhanden sind. Aus der Ableitung von MIV-Belastung und Geschwindigkeit werden die Faktoren neu definiert, wobei die Funktionen ihren Wendepunkt ungefähr beim Ende der möglichen Einsetzbarkeit nach Norm haben sollen. Da nur eine Funktion die Kurven beschreibt, wird nicht bei allen Führungsformen der genaue Wert erreicht. Diese sind in der Normierung aufgrund der Unschärfe in der Abbildung ebenfalls nicht starr festgesetzt und es existiert ein Graubereich in der Zuordnung. Die Grössenordnung des Faktors richtet sich teilweise nach der Literatur sofern diese vorhanden ist. Bei den Radwegen leitet sich die Grössenordnung nach der Routenwahlstudie ab, in welcher eine Abnahme der wahrgenommene Distanz von 16% bis 26% beobachtet werden kann (Broach, Gliebe und Dill, 2010). Die übrigen Infrastrukturen benötigen aufgrund der Verbindung mit der MIV-Belastung weiter differenzierte Grössen, welche so in der Literatur nicht gefunden werden konnten. Der Faktor wird daher aus den Studien abgeleitet, jedoch nicht direkt empirisch bestätigt. Zudem wird der Faktor in seiner Wirkung so gewählt, dass er um die abgelöste Funktion (schwarze Linie, Abb. 14) zu liegen kommt. Dies soll verhindern, dass das existierende Modell aufgrund der Veränderung des Velowiderstands sich zu stark verändert.

Abbildung 14: Infrastruktur- und geschwindigkeitsabhängiger MIV-Faktor (Velo)



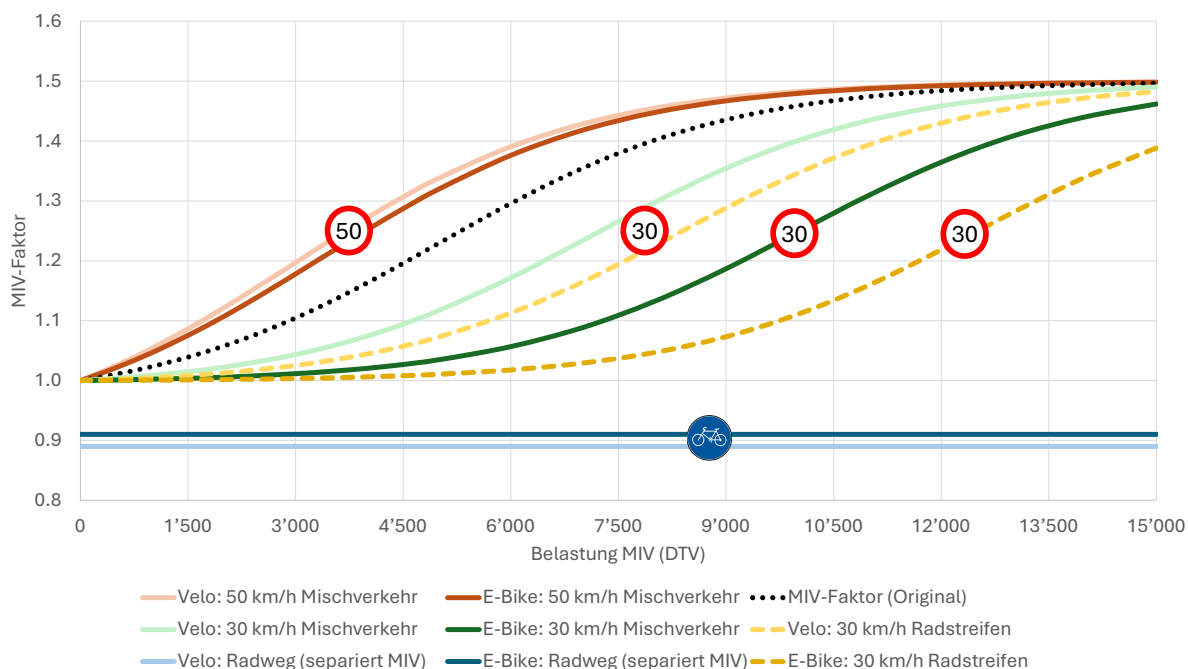
Quelle MIV-Faktor (Original): KVM-AG Ver. 2022 (Weis und Vrtic, 2022)

Die geringere Wahrnehmung der MIV-Belastung bei einem Radstreifen stammt aus der Überlegung, dass ein Radstreifen gegenüber der Führung im Mischverkehr bei einer kleinen Geschwindigkeitsdifferenz aber hoher MIV-Belastung von Vorteil ist. Der Radverkehr hat in diesem Fall durch den Radstreifen eine eigene Fahrspur wodurch er weniger mit dem MIV in Konflikt gerät.

Wenn der Radverkehr, insbesondere derjenige mit E-Bikes, eine höhere Geschwindigkeit erreichen kann als der MIV, wird der Faktor ebenfalls erhöht. Die reine Reisezeit wird bereits über die Höchstgeschwindigkeit berücksichtigt, da der Radverkehr ebenfalls darüber gedeckelt wird. Jedoch entsteht insbesondere im Mischverkehr ein zusätzlicher Aufwand durch die Kolonnenfahrt mit dem MIV sowie Einflüsse wie Lärm, Abgase und erhöhte Konzentration. Dies soll mit dem Faktor ebenfalls berücksichtigt werden.

Für das E-Bike verläuft der MIV-Faktor aufgrund der abweichenden Geschwindigkeit leicht abweichend. Sie beinhaltet dieselben Faktoren mit Ausnahme der E-Bike-Geschwindigkeit. Über den Belastung Max könnte die Sensitivität verändert werden, falls es hierfür Indikatoren aus der Literatur gibt.

Abbildung 15: Streckenspezifischer Wahrnehmungsfaktor (Velo und E-Bike)



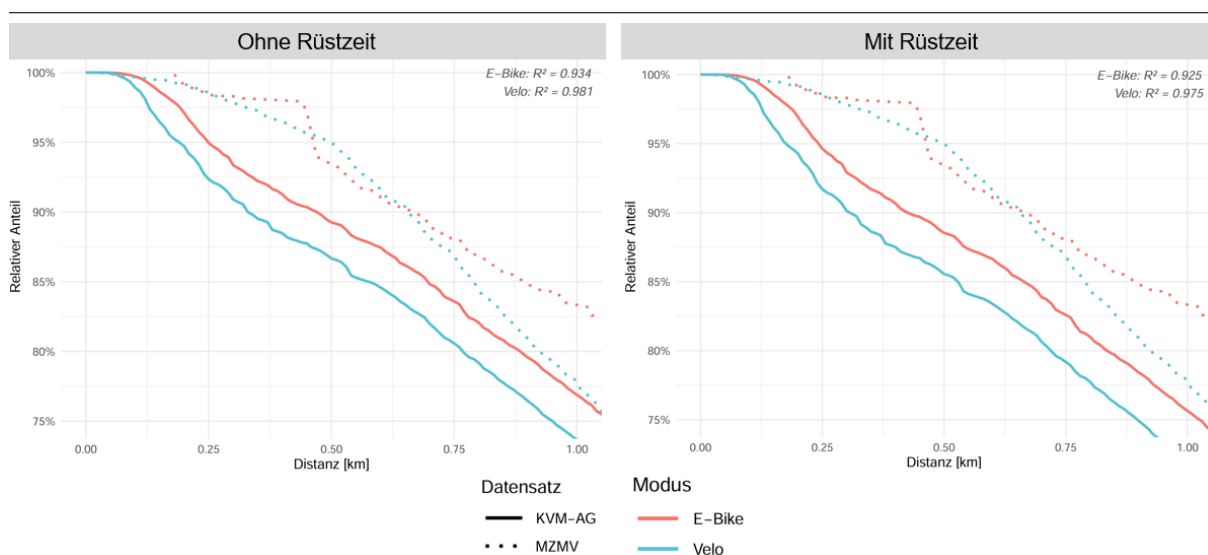
Quelle MIV-Faktor (Original): KVM-AG Ver. 2022 (Weis und Vrtic, 2022)

3.4.4 Rüstzeit

Die Auswertung des MZMV zeigt, dass kurze Wege im Radverkehr selten vorkommen. Beim Velo sind 0,8 % aller Wege kürzer als 200 Meter. Im Modell hingegen sind es über 5,2 %. Beim E-Bike sieht es vergleichbar aus mit 0,8 % der Wege im MZMV und 3 % im Modell (Datengrundlage MZMV 2021, BFS und ARE, 2023).

Um diese Diskrepanz zwischen Modell und Beobachtung zu schliessen, wird der Einbau einer Rüstzeit geprüft. Diese wird über eine Konstante in das bestehende Modell eingebaut. Als Versuchswert wird 2 Minuten Rüstzeit angenommen. Der Einbau erfolgt durch direkte Addition der Zeit auf die existierende Widerstandskenngrössenmatrix. Die Funktionsweise und die Wirkung werden anschliessend über die Auswertung der Distanzverteilung geprüft.

Abbildung 16: Distanzverteilung ohne (links) und mit Rüstzeit (rechts)



Datengrundlage:

MZMV: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

KVM-AG: Ursprungsmodell KVM-AG, Version 2022 (BVU AVK, 2024)

Der Einbau der Rüstzeit führt zu keiner ersichtlichen Verbesserung der Distanzverteilung. Womöglich sind die kurzen Wege im Modell nicht vergleichbar mit der beobachteten Verteilung im MZMV, da durch den Anbindungswege von der Zone an das Netz von vornherein eine Mindestlänge vorliegt. Wege innerhalb derselben Zone oder sehr kurze Wege werden daher vereinfacht abgebildet. Es wäre eine feinere Auflösung der Zonen nötig, um solche kurzen Wege korrekt umzulegen. Für ein Gesamtmodell ist dies jedoch ungeeignet aufgrund der Rechendauer und dem Fokus auf grössere Gebiete. Aus diesem Grund wird ein Einbau der Rüstzeit als Erweiterung im Modell verworfen.

3.4.5 Wahrgenommener Faktor zur Knotendichte

Der reine Zeitverlust an Knoten wird im KVM-AG bereits abgebildet. Jedoch bildet der reine Zeitaufwand nicht das vollständige Bild ab. Eine kreuzungsreiche Strecke ohne Belastung kann einen mentalen Aufwand erzeugen, obwohl kein realer Zeitverlust entsteht. Der Effekt wird in nationaler und internationaler Literatur beschrieben (Meister et al. 2022; Broach, Gliebe und Dill, 2010). Dieser wird als *Value of Distance*, kurz *VoD*, bezeichnet. Er beschreibt die angenommene Distanz aufgrund der eigenen Wahrnehmung. Für Radinfrastrukturen kann diese beispielsweise negativ sein, das bedeutet, die wahrgenommene Distanz ist kürzer als die tatsächliche Distanz. Das gleiche Phänomen existiert bei Kreuzungen. Es fehlt folglich ein Verhaltensparameter, welcher den zusätzlichen Aufwand beschreibt, den eine knotenreiche Strecke auslösen kann.

Hierfür wird in einem ersten Schritt die abgebildete Knotendichte auf verschiedenen Raumtypenbeziehungen untersucht. Dies geschieht, indem alle Knoten zwischen zwei Zonen gezählt werden. Es basiert auf der gleichen Funktionsweise wie die Knotenwiderstände, nur das anstelle der Reisezeit die Anzahl Knoten zusammengezählt wird. Hierbei werden alle Knoten gezählt, ausser rein modelltechnische Knoten wie Haltestellen oder Zonenanbindungen.

Um eine Auswertung nach Raumtypen überhaupt zu ermöglichen, müssen diese zuerst im Modell implementiert werden. Die Zuordnung der Raumtypen erfolgt auf Basis der «Räume mit städtischem Charakter» des Bundesamtes für Statistik¹. Um eine genügende Anzahl an Beobachtungen im MZMV sicherzustellen, werden die sieben Kategorien des BFS vereinfacht in drei Kategorien: Kern, Umland und Ausserhalb (Tab. 3). Die Neustrukturierung respektive Zusammenfassung der Raumkategorien erfolgt in Anlehnung an die verwendeten Kategorien im Raumkonzept Aargau (BVU, 2015) sowie der Mobilitätsstrategie (AVK, 2016). Hierbei wird in der Regeln von Kernstädten, ländlichen und urbanen Entwicklungsräumen gesprochen. Die Zwischenstufen lassen sich aufgrund der ähnlichen Eigenschaften wie der Bevölkerungsentwicklung in die drei Kategorien zusammenfassen, was den Einbau sowie den Unterhalt des Modells vereinfacht. Folglich werden im Modell als Raumtyp die Kategorien Kern, Umland und Ausserhalb eingeführt.

Die Zuordnung erfolgt über die bestehenden Obermatrizen, welches ein schnelles Auswerten und ein vereinfachtes Einbauen der Raumtypen ermöglicht. Der Einbau wird anschliessend visuell im Netzeditor überprüft.

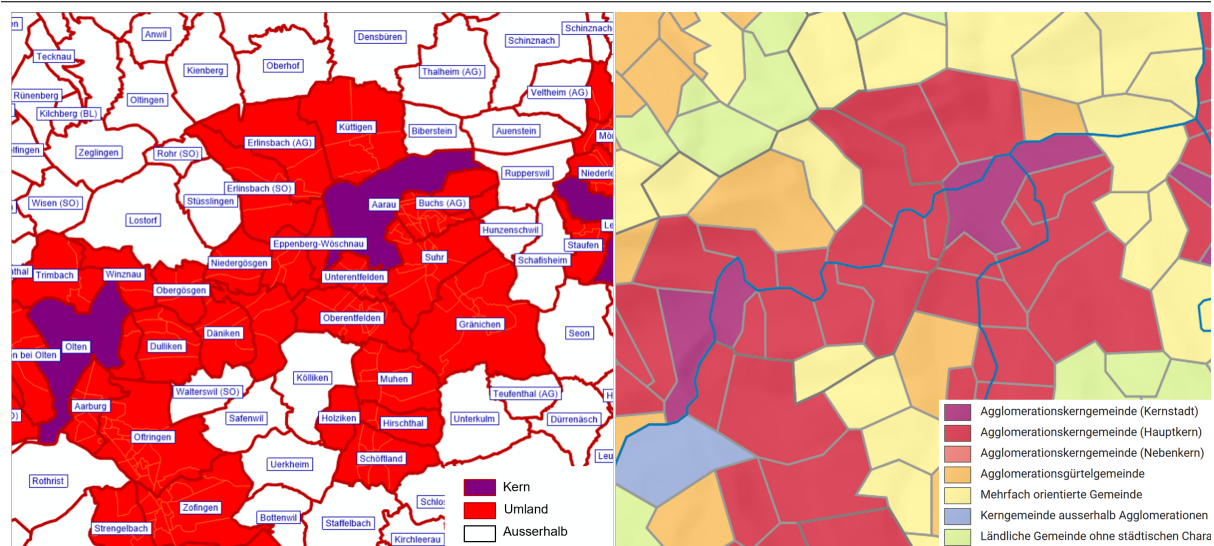
¹Räume mit städtischem Charakter, BFS (2025): bfs.admin.ch/bfs, zuletzt besucht am 17.06.2025

Tabelle 3: Übersicht Raumtypenvereinfachung

Code	Label	Zuordnung im Modell
1	Agglomerationskerngemeinde (Kernstadt)	Kern
2	Agglomerationskerngemeinde (Hauptkern)	Umland
3	Agglomerationskerngemeinde (Nebenkern)	Umland
4	Agglomerationsgürtelgemeinde	Ausserhalb
5	Mehrfach orientierte Gemeinde	Ausserhalb
6	Kerngemeinde ausserhalb Agglomerationen	Ausserhalb
0	Ländliche Gemeinde ohne städtischen Charakter	Ausserhalb

Datengrundlage (Code und Label): Raumgliederungen, Bundesamt für Statistik BFS, 2025

Abbildung 17: Einbau Raumtypen

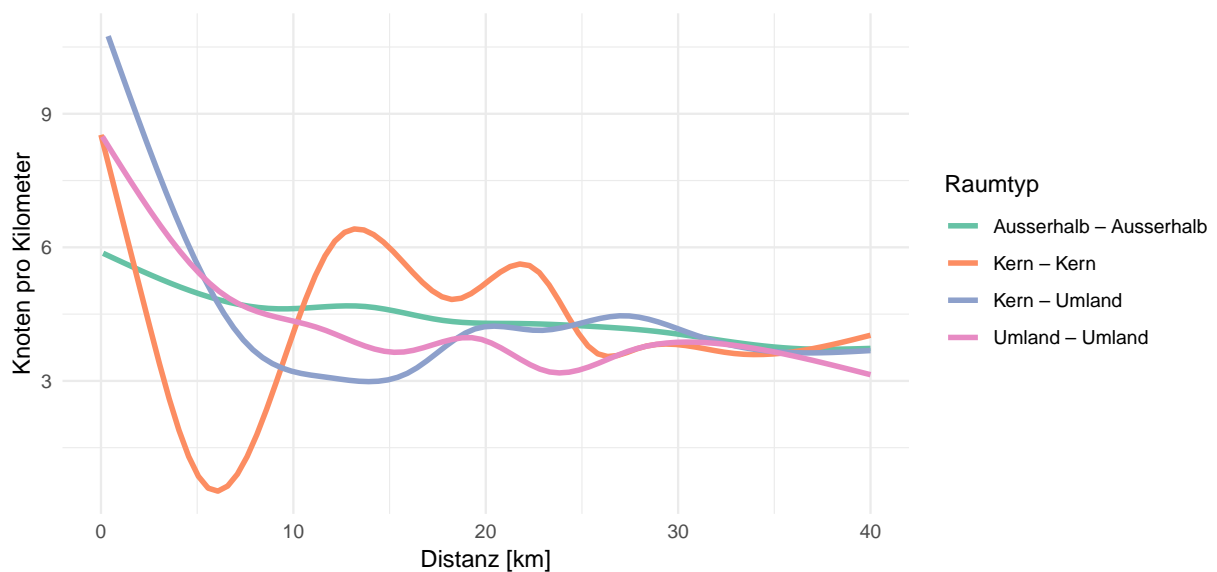


Ausschnitt Netzeditor KVM-AG

© 2025 Bundesamt für Statistik BFS

Um die relative Vergleichbarkeit herzustellen, wird die reine Anzahl an Knoten durch die Distanzen dividiert, sodass die Knotendichte ausgegeben wird. Als Funktionstest werden diverse Verbindungen mittels der Kurzwegsuche geprüft und durch händisches Abzählen mit den Werten aus der Matrix verglichen.

Abbildung 18: Knotendichte nach Distanz und Raumtypenbeziehung

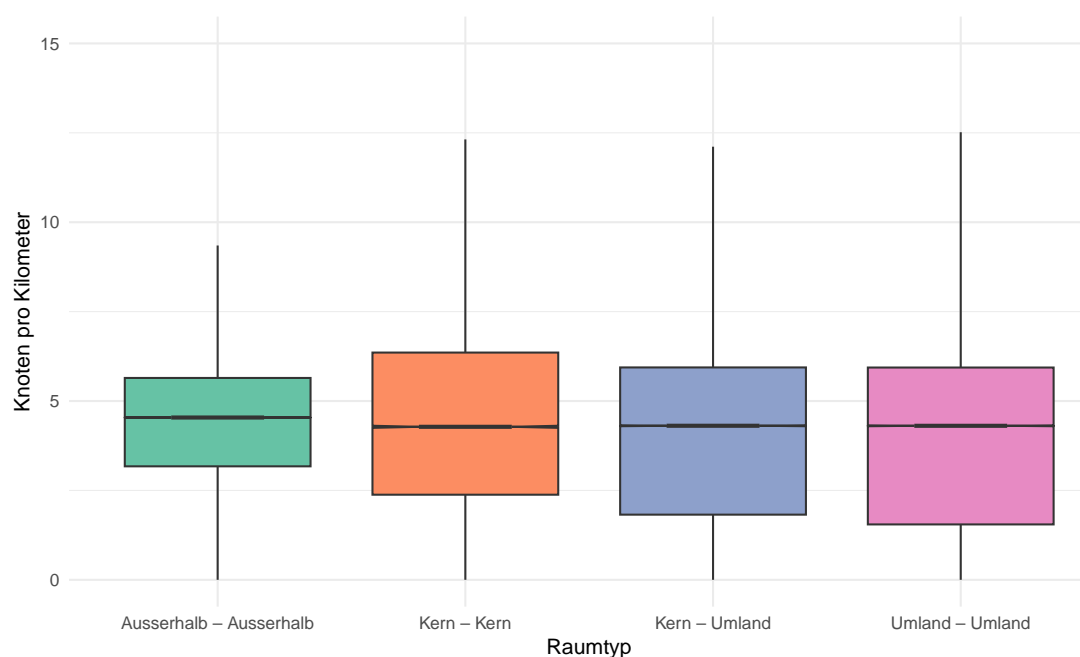


Quelle: Auswertung des Netzmodells des KVM-AG Ver. 2022 (BVU AVK, 2024)

Der Verlauf der Knotendichte über die Distanz für die verschiedenen Raumtypenbeziehungen zeigt unterschiedliche Ausprägungen auf (Abb. 18). Die Beziehung Kern-Umland hat hierbei die höchste Knotendichte zu Beginn während die Beziehung von Ausserhalb-Ausserhalb die tiefste besitzt. Die Werte zeigen jedoch eine hohe Schwankung und stabilisieren sich erst bei Distanzen über 25 Kilometern. Diese Distanzen sind jedoch für den Radverkehr nicht relevant.

Betrachtet man den Boxplot (Abb. 19), so wird ersichtlich, dass sich die verschiedenen Raumtypen hinsichtlich der durchschnittlichen Knotendichte kaum unterscheiden. Lediglich die Streuung variiert leicht, jedoch ist diese zu gering, um von signifikanten Unterschieden zu sprechen. Weitere mögliche Raumtypenbeziehungen werden aufgrund des späteren Vergleichs mit dem MZMV und zu Gunsten der Lesbarkeit an dieser Stelle nicht vertieft analysiert. Sie befinden sich alle innerhalb der vorher dargestellten Wertebereichen.

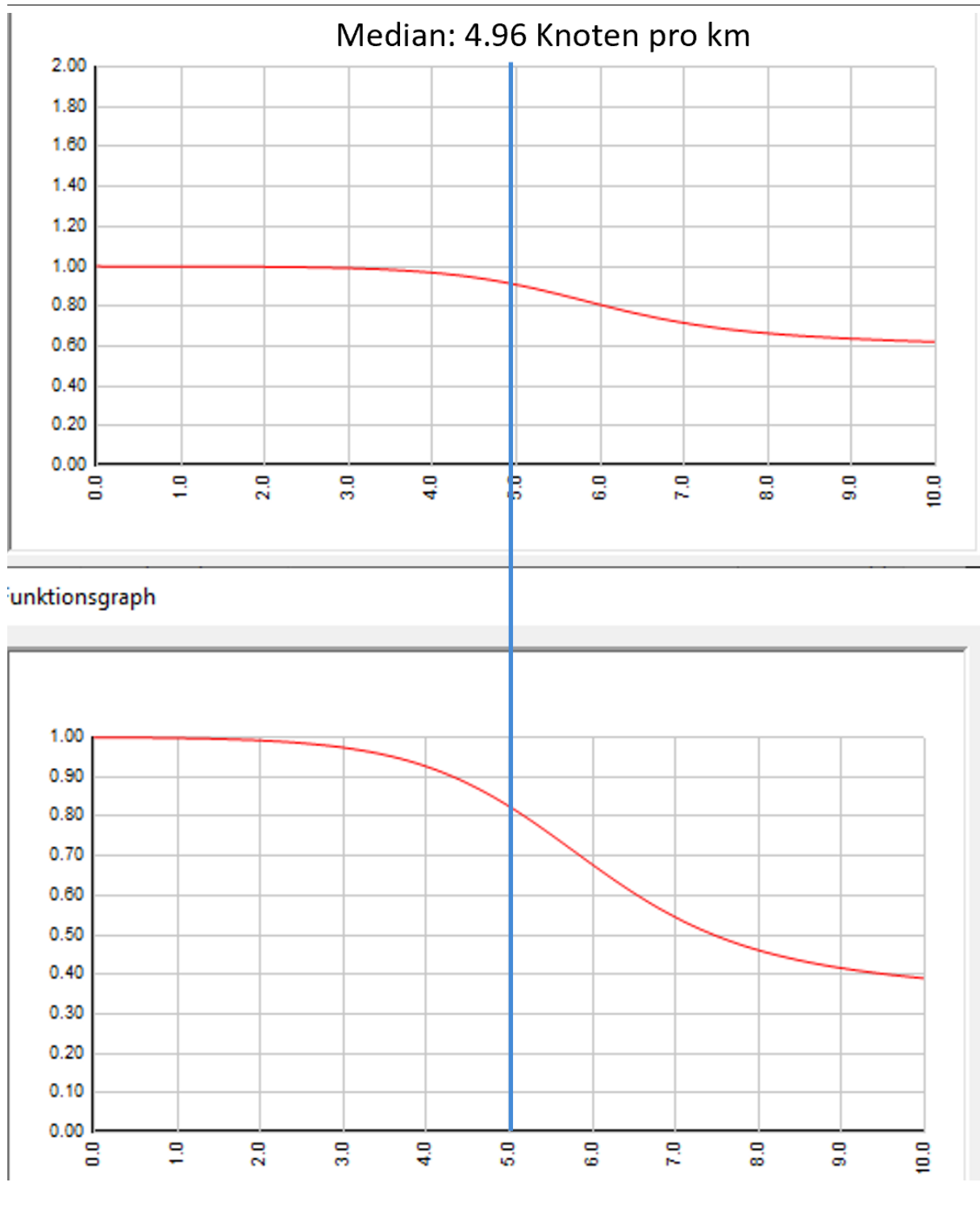
Abbildung 19: Knotendichteverteilung nach Raumtypenbeziehung



Quelle: Auswertung des Netzmodells des KVM-AG Ver. 2022 (BVU AVK, 2024)

Da bei der Distanzverteilung teilweise deutliche Unterschiede zu erkennen sind, wird ein testweiser Einbau vorgenommen, um die Auswirkungen auf die Raumtypenbeziehungen zu untersuchen. Der Einbau erfolgt über eine neue Aufwandsart *Knotenanzahl* und fließt daher über die EVA-Bewertung in die Aufteilung des Radverkehrs mit ein. Hierbei wird eine Version *mit Knotendichte* erstellt, bei welcher sich der Widerstand am Median der Knotendichte orientiert. Der zugehörige Faktor liegt zwischen 1 und 0,6. Zur Prüfung der Sensitivität wird noch eine *mit starker Knotendichte* erstellt, welche eine stärkere Steigung der Widerstandsfunktion verwendet (Abb. 20).

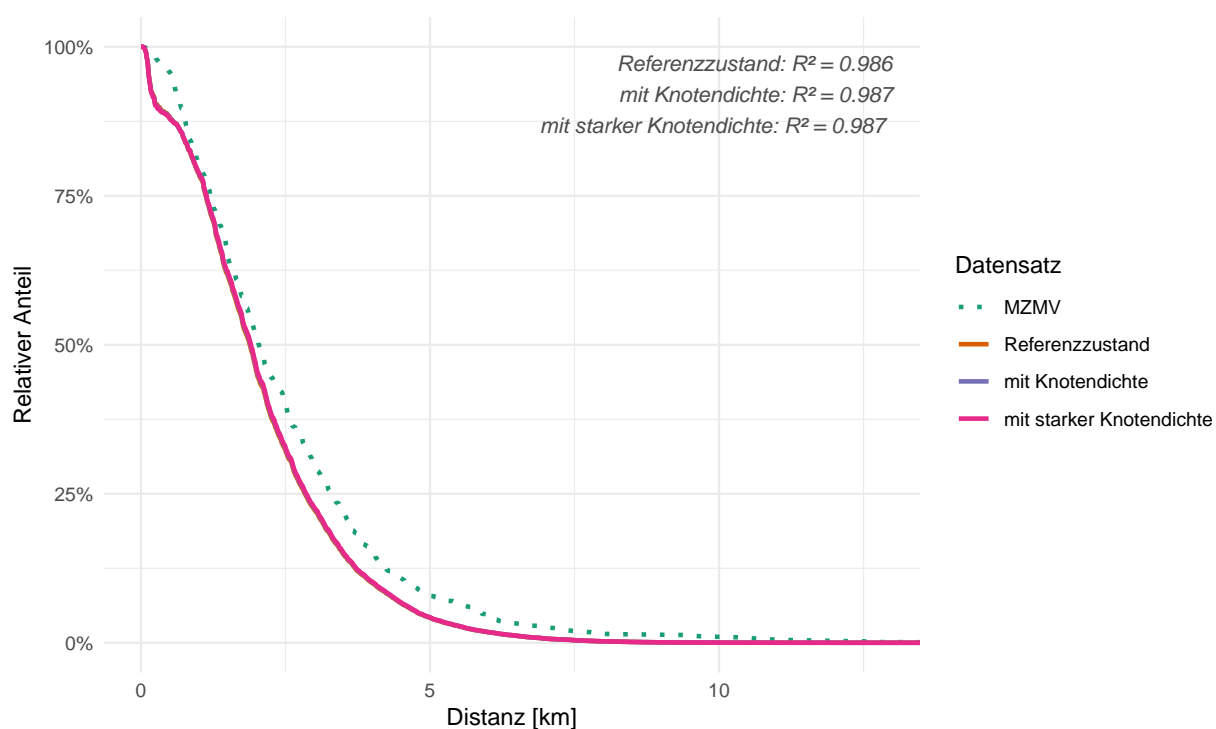
Abbildung 20: Eingebaute Aufwandsart Knotenanzahl



Die Auswertung ergibt keine deutliche Verbesserung der Distanzverteilungen in den verschiedenen Raumtypenbeziehungen (vgl. Abb. 21 und 22). Diese schwanken leicht, bleiben im gros-

sen und ganzen jedoch weitgehend unverändert. Aus diesem Grund wird der Einbau eines wahrgenommenen Knotenwiderstands an diesem Punkt nicht weiterverfolgt. Die Kalibrierung der Raumtypenbeziehung scheint mittels Knotendichten nicht realisierbar zu sein. Eher eignet sich die Verwendung der Radaffinität. Dies ist jedoch Teil der Kalibrierung und erfolgt im nächsten Abschnitt.

Abbildung 21: Einfluss des Knotendichteaufwands Modus Velo auf Relation Kern nach Kern

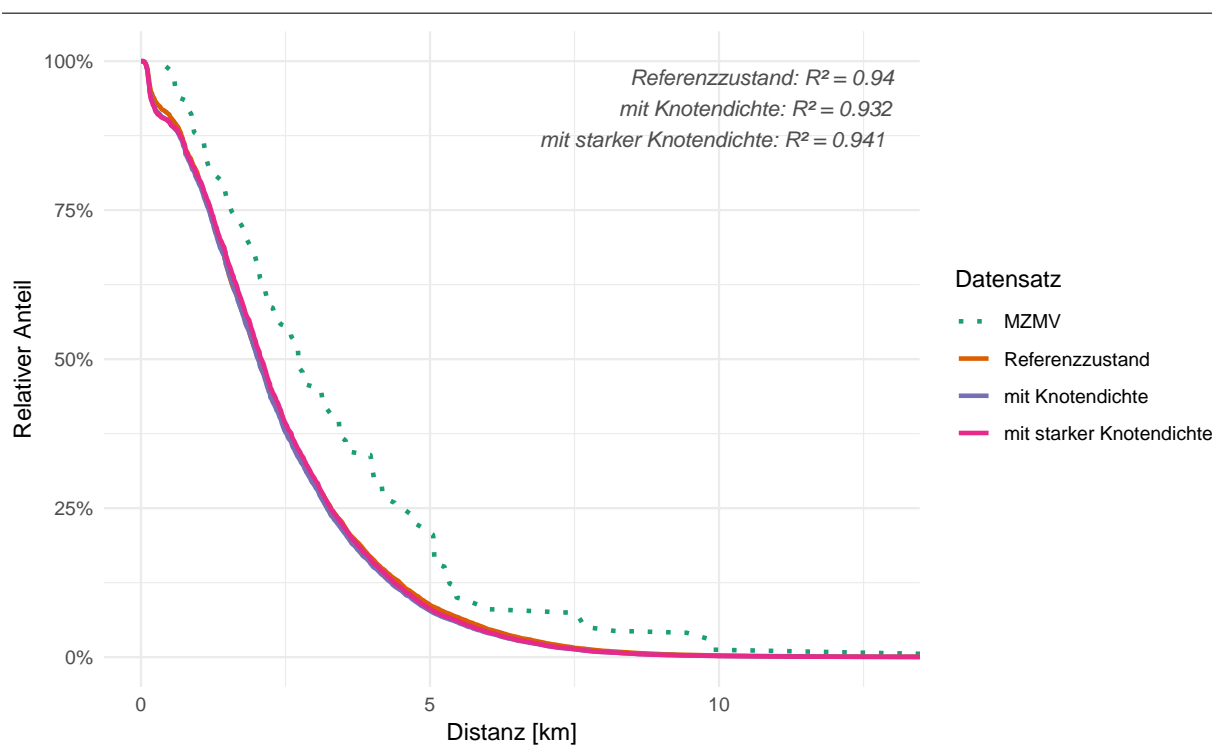


Datengrundlage:

MZMV: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

KVM-AG: Modifiziertes KVM-AG, Version 2022 (BVU AVK, 2024)

Abbildung 22: Einfluss Knotendichte E-Bike Kern-Kern



Datengrundlage:

MZMV: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

KVM-AG: Modifiziertes KVM-AG Version 2022 (BVU AVK, 2024)

3.5 Radnutzungsquote

Der Abschnitt «Radnutzungsquote» wurde im Rahmen der Seminararbeit 1 erarbeitet

Die Radnutzungsquote zielt darauf ab, das räumlich unterschiedliche Nutzungsverhalten von Velos und E-Bikes im Modell abzubilden. Damit soll das Modell sensitiv auf Veränderungen im Nutzungsverhalten und in den Besitzquoten gemacht werden. Als räumlichen Verteilungsschlüssel wird hierbei die ÖV-Güteklasse verwendet.

Für die vollständige Abbildung der Nutzungsquoten bedarf es weiterer Einflussgrößen, welche das Nutzungsverhalten bestimmen. Dazu gehören insbesondere die Topografie, das Einkommen sowie der MIV-Besitz. Diese Aspekte liegen jedoch ausserhalb des definierten Rahmens der Semesterarbeit.

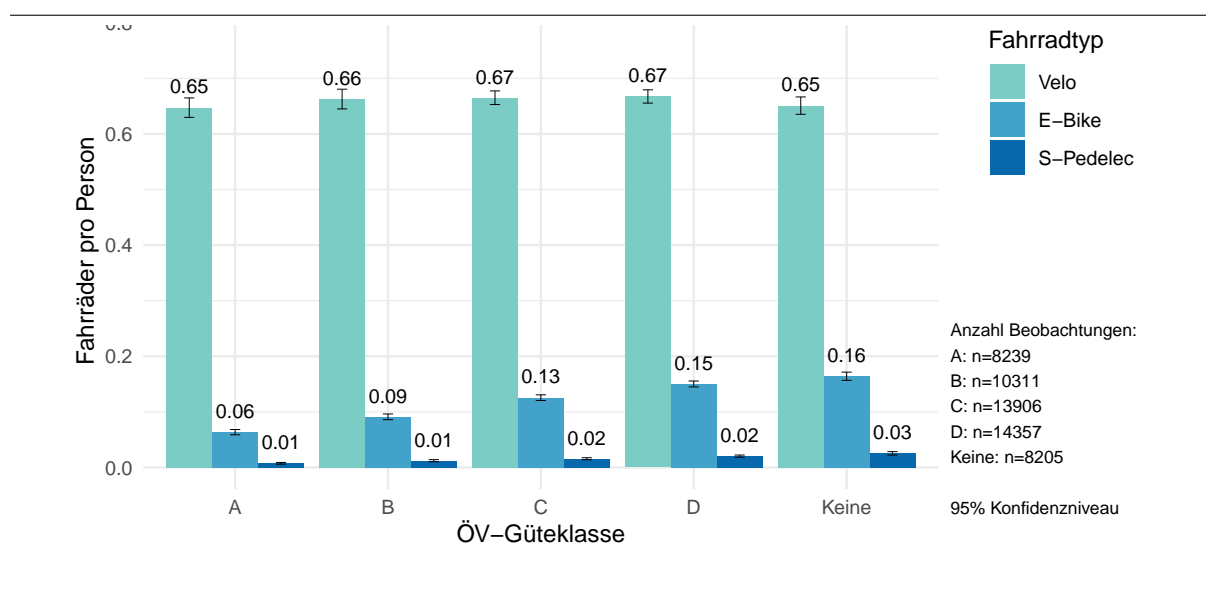
3.5.1 Daten und Methodik

Die Datengrundlage für die Auswertung und Einbau ins Modell stellt der MZMV von 2021 dar. Im Rahmen des MZMV wird bereits der Verkehrsmittelbesitz, die ÖV-Güteklasse am Wohnort sowie Fahrten erhoben. Somit eignet sich der MZMV optimal als Datengrundlage für den Einbau einer Nutzungsquote.

Besitzquote

Die Auswertung der Fahrradbesitzquote pro Kopf, aufgeschlüsselt nach der ÖV-Güteklasse am Wohnort zeigt auf, dass die Besitzquote mit der ÖV-Güteklasse variiert (Abb. 23).

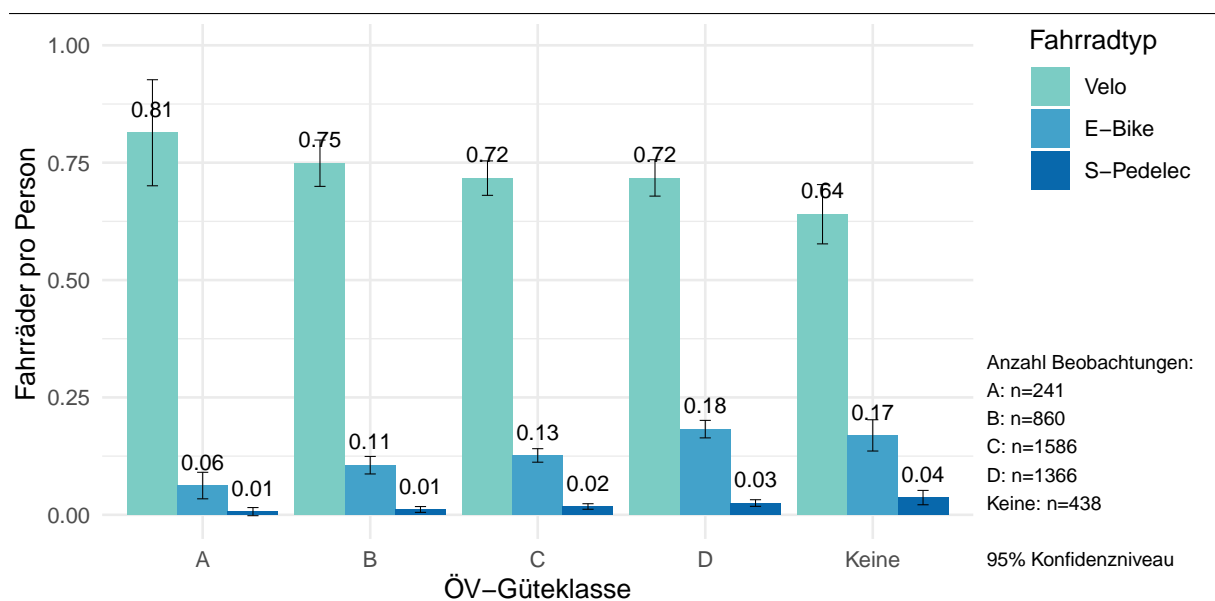
Abbildung 23: Durchschnittliche Anzahl Fahrräder pro Person (ganze Schweiz)



Datengrundlage: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

Im Kanton Aargau sind die Unterschiede zwischen der Besitzquote und ÖV-Güteklasse deutlicher als im schweizweiten Vergleich. Für E-Bikes und S-Pedelecs zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen Besitzquote und abnehmender ÖV-Güteklasse. Beim Velo verhält es sich umgekehrt, die Besitzquote nimmt mit der ÖV-Güteklasse ab (Abb. 24).

Abbildung 24: Durchschnittliche Anzahl Fahrräder pro Person (Kt. Aargau)



Datengrundlage: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

Abgrenzung und Methodik

Um für das KVM-AG geeignete Daten zu erhalten, wird der Datensatz des MZMV nach Wohnort sortiert. Da der ÖV ausserhalb des Kerngebiets nicht vollständig und detailliert abgebildet ist, wird der Fokus auf das Kerngebiet gelegt (vgl. Abb. 1). Dies führt zu Problemen bei der Auswertung des Modalsplits nach ÖV-Güteklasse. Der Anteil beobachteter E-Bike-Fahrten ist sehr gering, was hohe Konfidenzintervalle verursacht. Diese sind beim E-Bike teilweise höher als die Modalsplit-Anteile selbst. Um dennoch eine genügende Datenbasis zu gewährleisten, wird ein methodischer Kompromiss gewählt:

- Für die Besitzquote werden ausschliesslich Beobachtungen aus dem Kanton Aargau genutzt.
- Für den Modalsplit nach ÖV-Güteklasse wird das gesamte inländische Modellgebiet des KVM-AG herangezogen.

So kann einerseits die lokale Situation berücksichtigt werden, andererseits bleibt die statistische Grundlage relativ stabil. Der Konfidenzintervall ist für die angezeigten Fahrten jedoch

immernoch hoch (Tab. 4). Für eine methodisch und datentechnisch vollständig korrekte Umsetzung wären entweder mehr kantonale Beobachtungen oder eine Anpassung des ÖV-Angebots im gesamten Modellperimeter notwendig. Beides liegt ausserhalb des Rahmens der Arbeit und daher wird mit den vorhandenen Daten weiter gearbeitet.

Tabelle 4: Modalsplit nach ÖV-Güteklasse

ÖV-Gütekl.	Modalsplit ± Konfidenzintervall		Anz. Beob.		
	Velo [%]	E-Bike [%]	Velo	E-Bike	
Auswertung nur Kanton Aargau					
A	9.47 ± 3,96	0.34 ± 4,07	54	2	
B	7.79 ± 2,05	0.42 ± 2,27	169	8	
C	9.41 ± 1,54	1.26 ± 1,59	355	49	
D	7.04 ± 1,52	2.28 ± 2,02	282	54	
Keine	8.28 ± 3,16	2.02 ± 4,04	75	12	
Auswertung gesamtes inländisches Gebiet des KVM-AG					
A	13.46 ± 1,30	1.19 ± 1,30	685	69	
B	10.31 ± 1,09	1.23 ± 1,14	766	92	
C	7.95 ± 0,94	1.68 ± 1,01	823	159	
D	6.89 ± 1,04	2.19 ± 1,23	585	140	
Keine	7.89 ± 1,82	1.62 ± 1,96	216	41	

Datengrundlage:

MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

Konfidenzniveau 68%

Herleitung der Nutzungsquote

Der reine Besitz eines Verkehrsmittels lässt nicht direkt auf dessen Nutzung schliessen. Daher wird nebst der Besitzquote auch der Modalsplit in der jeweiligen ÖV-Güteklasse betrachtet. Die Radnutzungsquote ergibt sich durch nachfolgende Überlegung: Besitzrate und Nutzungsrate ergeben gemeinsam den Modalsplit des jeweiligen Verkehrsmittels. Da die Nutzungsquote unbekannt ist, wird die Gleichung umgestellt, sodass sich die Nutzungsquote aus dem Modalsplit und der Besitzquote ableiten lässt (Formel 13).

$$M_k \cdot N_k = P_k \Rightarrow \frac{P_k}{M_k} = N_k \quad (13)$$

- M_k : Verfügbarkeit (Besitzquote) des Modus k
- N_k : Nutzungsquote des Modus k
- P_k : Auswahlwahrscheinlichkeit des Modus k

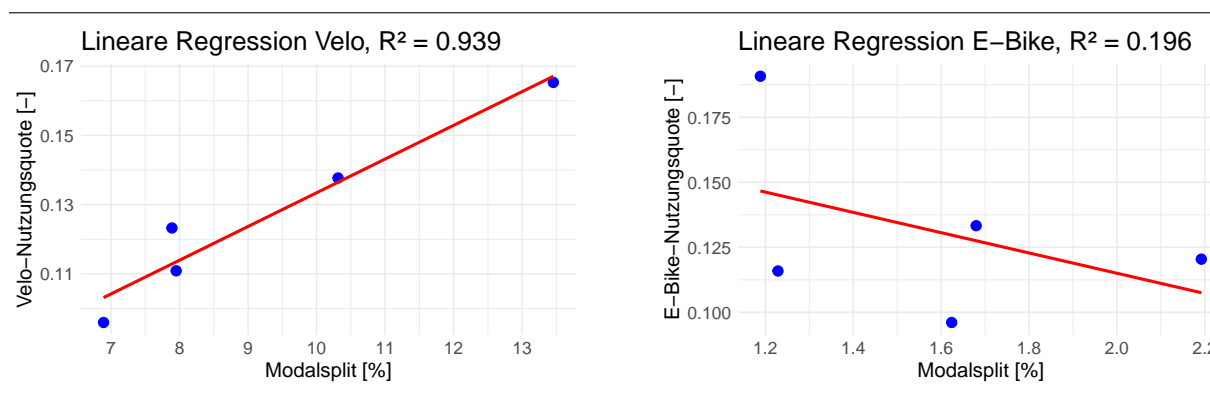
Regressionsanalyse

Auf Basis der Daten werden die Nutzungsquoten nach ÖV-Güteklassen berechnet. Zur Analyse des Zusammenhangs wird eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt, basierend auf fünf Datenpunkten pro Verkehrsmittel.

Beim Velo zeigt sich eine klare lineare Beziehung. Mit steigendem Anteil am Modalsplit nimmt auch die Nutzungsquote zu. Das Bestimmtheitsmass weist auf eine starke Übereinstimmung mit dem linearen Modell hin (Abb. 25, links).

Beim E-Bike hingegen ergibt sich ein anderes Bild. Die Datenpunkte streuen stark, die Regressionsgerade verläuft gar negativ. Damit prognostiziert sie eine abnehmende Nutzungsquote bei zunehmendem Modalsplit (Abb. 25, rechts). Aufgrund des tiefen Bestimmtheitsmasses liefert die Regression keine verlässliche Erklärung. Schon aufgrund des hohen Konfidenzintervalls bei den E-Bikes ist die Regression von Beginn nicht robust aufgestellt.

Abbildung 25: Vergleich Modalsplit und Nutzungsquote von Velos (links) und E-Bikes (rechts)



Datengrundlage: MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

3.5.2 Umsetzung im Modell

Der Einbau ins Modell erfolgt stufenweise. Um eine realitätsnahe Abbildung der Nutzungsquote zu ermöglichen, ist zuerst ein Einbau der ÖV-Güteklasse nötig. Diese ist im vorliegenden Modell nicht enthalten. Die Auswertung und Verarbeitung dieses Vorgangs erfolgte in R ausserhalb von PTV Visum. Aufgrund dieser Vorgehensweise führt eine Anpassung des ÖV-Angebots im Modell nicht automatisch zu einer Veränderung der Besitzquote und der ÖV-Güteklasse. Solche Angebotsveränderungen müssen entweder händisch oder durch eine externe Berechnung erneut eingepflegt werden. Eine Automatisierung der Aktualisierung wäre denkbar, wird jedoch aus Zeitgründen nicht umgesetzt. Zur händischen Überprüfung der korrekten Implementierung wird die Software QGIS herangezogen.

Gebäudegewichtete Ermittlung der ÖV-Güteklasse pro Verkehrszone

Um die ÖV-Güteklassen möglichst realitätsnahe abzubilden, werden die Gebäudegrundrisse als räumliche Referenz verwendet und anschliessend mit der öV-Güteklasse verschnitten. Dies soll vereinfacht den Fakt abbilden, dass der Parkraum für Fahrräder typischerweise am Wohnort, sprich in oder an einem Gebäude ist. Dieses Vorgehen erlaubt einen detaillierten Einbau der öV-Güteklasse, welche möglichst Nahe der Datengrundlage des MZMV entspricht. Auch dort erfolgt die Auswertung der Besitzquote nach Wohnstandort und folglich öV-Güteklasse. Am Ende des Prozesses wird die relative Abdeckung jeder ÖV-Güteklasse für jede Zone berechnet basierend auf den darin vorkommenden Gebäudegrundrissen.

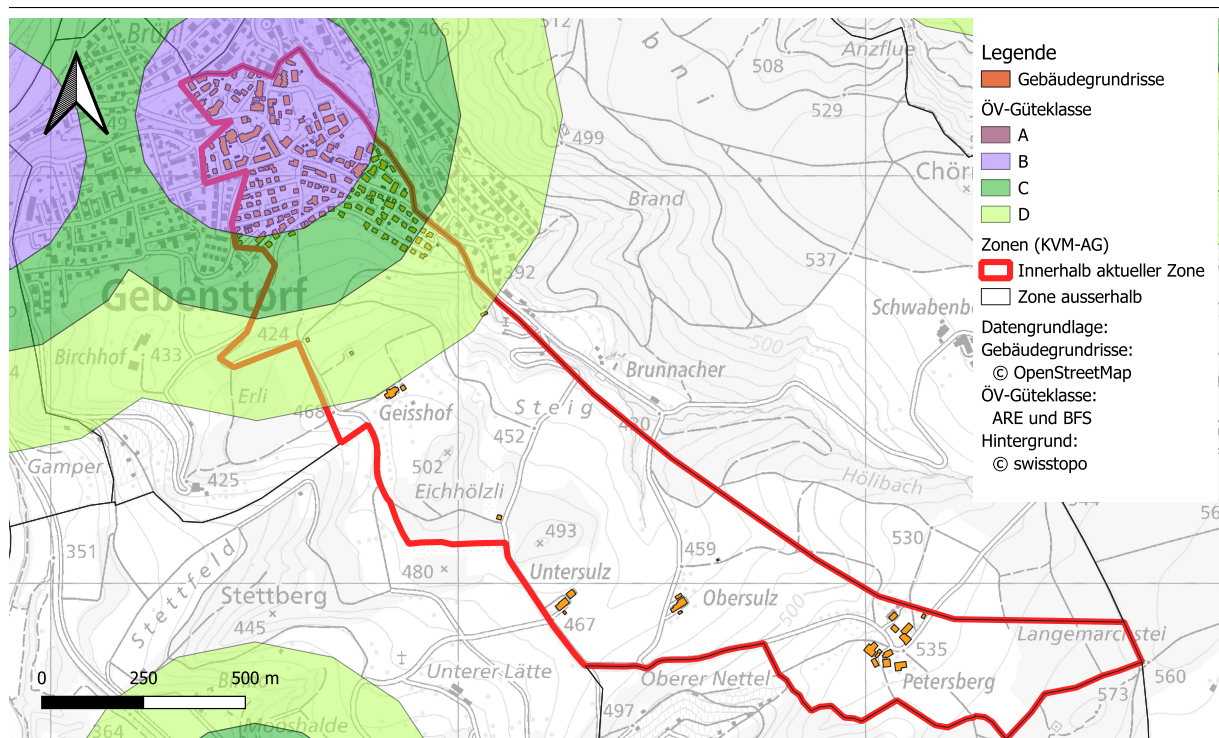
Die Gebäudegrundrisse stammen aus der OpenStreetMap-Datenbank. Diese sind als offene Daten frei zugänglich. Ein zentraler Vorteil von OpenStreetMap (OSM) gegenüber dem Eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) liegt in der grenzüberschreitenden Verfügbarkeit, was insbesondere für das KVM-AG relevant ist, da hier auch grenznahe süddeutsche Gemeinden abgebildet werden. Zu beachten ist jedoch, dass die ÖV-Güteklassen nur für das Schweizer Staatsgebiet vorliegen. Die Methodik müsste daher, sofern ausländischen Zonen miteinbezogen werden, für diese separat nach der vorgegebenen Methodik des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE)² berechnet werden. Da die Implementierung der Nutzungsquote sowie deren Kalibrierung ausschliesslich auf dem Gebiet des Kantons Aargau erprobt werden, wird auf eine zusätzliche Berechnung der ausländischen ÖV-Güteklassen verzichtet. Entsprechend hätte auch das GWR für diese Arbeit als Datengrundlage verwendet werden können.

Die Verwendung der Gebäudegrundrisse erlaubt es, auf einfache Weise zu ermitteln, wie gut eine Zone an das ÖV-Netz angeschlossen ist, ohne das unbebaute Flächen wie Wälder, Landwirtschaft oder ähnliche Gebiete das Ergebnis verzerren. Diese Verschneidung wird für jede der knapp 2'000 Zonen des KVM-AG getan. Die schrittweise Verarbeitung dient dazu, den Arbeitsspeicherbedarf möglichst gering zu halten. Zudem gilt es die Downloadrichtlinien der OSM-Datenbereitstellenden in den AGB zu beachten, welche den Datenbezug einschränken können. Die räumliche Zuordnung der ÖV-Güteklassen stammt aus der öffentlich Datenbank des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE)³.

²ARE, ÖV-Güteklassen Berechnungsmethodik: are.admin.ch, zuletzt besucht am 22.06.2025

³ARE, Verkehrserschliessung in der Schweiz: data.geo.admin.ch/verkehrserschliessung, zuletzt besucht am 05.06.2025

Abbildung 26: Verschneidung von Gebäudegrundrissen und ÖV-Güteklasse nach Zonen des KVM-AG am Beispiel Gebenstorf



Datengrundlage:

Zonengrenzen aus dem KVM-AG Ver. 2022 (BVU AVK, 2024)

Karte wurde mit QGIS Version 3.42 erstellt

Erweiterung der Strukturdaten

Im bestehenden KVM-AG (Version 2022) liegen den Zonenstrukturdaten keine Informationen über die ÖV-Güteklasse bei. Um die spätere Modellierung der Radnutzungsquote auf Basis dieser Klassen zu ermöglichen, werden zusätzliche Zonenattribute eingeführt um später mit den berechneten Anteilen bestückt zu werden (Abb. 27). Dieses dient als technische Grundlage für die Verknüpfung der zuvor beschriebenen Auswertungen.

Abbildung 27: Ausschnitt der erweiterten Strukturdaten im KVM-AG

Anzahl: 1,923	Nr	Name	OEV_A	OEV_B	OEV_C	OEV_D	OEV_KEINE
1442	420000005	Hunzenschwil 5	0.00000	0.00000	0.69576	0.43945	0.00000
1443	420000006	Hunzenschwil 6	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
1444	420000007	Hunzenschwil 7	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
1445	420100001	Lenzburg 1	0.11885	0.61453	0.38764	0.00000	0.02286
1446	420100002	Lenzburg 2	0.00000	0.43275	0.58697	0.02509	0.03531
1447	420100003	Lenzburg 3	0.42926	0.53943	0.07883	0.00000	0.00000
1448	420100004	Lenzburg 4	0.68476	0.33648	0.00000	0.00000	0.00000
1449	420100005	Lenzburg 5	0.98603	0.02035	0.00000	0.00000	0.00000

Die dafür benötigten ÖV-Güteklassenanteile je Zone werden ausserhalb des KVM-AG ermittelt. Sie basieren auf der zuvor beschriebenen Verschneidung der Gebäudegrundrisse mit den öffentlich verfügbaren Daten des ARE. Durch Verschneidung der Zonen mit den zuvor ausgewerteten Daten erhält man die relativen ÖV-Güteklassenanteile pro Zone. Der Import dieser Daten erfolgt mittels einem Python-Skript, das die Zuordnung anhand der Zonennummer vornimmt. Damit ist die benötigte Erweiterung der Strukturdaten abgeschlossen und die zonenspezifische Radnutzungsquote kann berechnet werden.

Einbau Radnutzungsquote

Die Radnutzungsquote kann über ein Formelattribut in der Zone erstellt werden. Für die Implementierung einer Radnutzungsquote wird für jede Zone und jeden Modi eine gewichtete Nutzungsquote festgelegt. Die Berechnung der Nutzungsquote stammt aus der zuvor beschriebenen Auswertung des MZMV. Durch das neue Zonenattribut ÖV-Güteklassenabdeckung $w_{i,z}$ kann eine zonenspezifische Nutzungsquote $N_{k,z}$ berechnet werden (Formel 14).

$$N_{k,z} = \sum_{i \in \{A,B,C,D,Keine\}} N_{i,k} \cdot w_{i,z} \quad (14)$$

- $N_{k,z}$: Gewichtete Nutzungsquote des Modus k für die Zone z
- $N_{i,k}$: Allgemeine Nutzungsquote nach ÖV-Gütekategorie i des Modus k
- $w_{i,z}$: Relativer Anteil (Abdeckung) der ÖV-Gütekategorie i in der Zone z

Im Modell geschieht diese Berechnung über ein Formelattribut. Dieses berechnet aufgrund der vorgegebenen Besitzquote, Modalsplit und ÖV-Güteklassenanteile eine gewichtete Nutzungsquote pro Zone und Modus. Um die spätere Kalibrierung zu vereinfachen, wird die Transformation zum Nutzungsquotenaffinitätsfaktor f_{NQ} direkt im Formelattribut vorgenommen (Abb. 28). Aufgrund der Auswertung des MZMV-Datensatzes wird für die Transformation eine linearer Zusammenhang angenommen (vgl. Abb. 25). Dementsprechend erfolgt die Umwandlung in

einen Faktor über die zwei zusätzlichen Parameter a und b (Formel 15). Im Rahmen der daran anschließenden Kalibrierung wird deren Steilheit (a) und Konstante (b) festgelegt.

$$f_{NQ,k,z} = N_{k,z} \cdot a + b \quad (15)$$

- $f_{NQ,k,z}$: Nutzungsquotenaffinitätsfaktor der Zone z für Modus k
- a : Steigungsparameter zur Transformation, gibt die Sensitivität von f_{NQ} gegenüber $N_{k,z}$ an
- b : Konstante für die Transformation

Abbildung 28: Formel für Attribut Nutzungsquotenaffinität E-Bike

```

Formel für Attribut 'ZONE;ZON_EBIKE' bearbeiten
IF([B_FUNKTIONALERÄUME] > 0, (
[OEV_A] * ( 0.011885 / 0.06425447) +
[OEV_B] * ( 0.012286 / 0.07496034) +
[OEV_C] * ( 0.016797 / 0.10773573) +
[OEV_D] * ( 0.021922 / 0.12069162) +
[OEV_KEINE] * ( 0.016240 / 0.13897331))
* 3.3 + 0.028,
1)
  
```

Um den Effekt der Nutzungsquote im Modell wirken zu lassen, wird eine neue Aufwandsart im Nachfragemodell eingeführt. Die Nutzungsquote wird wie beschrieben ohne Transformationsfunktion für die EVA-Bewertung verwendet (Abb. 29).

Abbildung 29: Aufwandsart Nutzungsquote E-Bike

Aufwandsart	Gen. Kosten	KennMat / BezAttr / LinKomb	Transformationsfunktion	a	b	c	Max. Wid.	PKF	
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE	keine Transformation					1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE	keine Transformation					1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph
Besitzquote	<input type="checkbox"/>	Q: ZON_EBIKE						1	Graph

Operand auswählen ✕

Matrix direkt auswählen

Matrix nach Eigenschaften auswählen

Quelle/Ziel-Attribut (Bezirk)

Konstante

FROM: Bezirk ▾

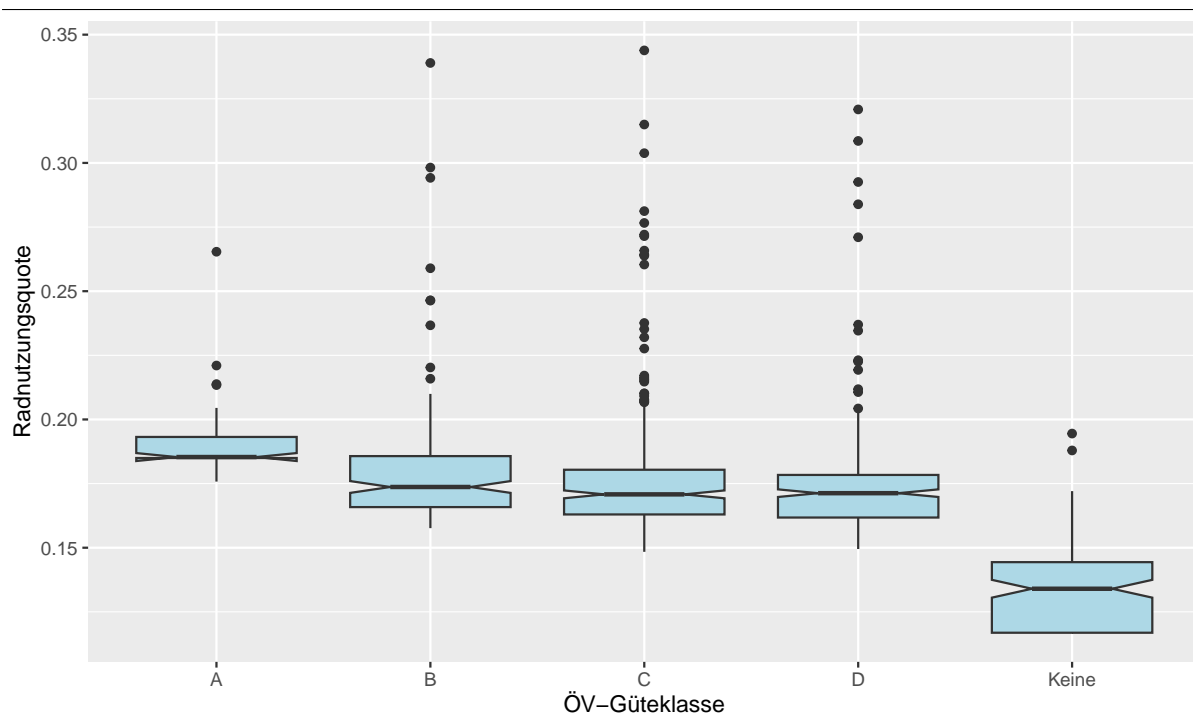
Gewähltes Attribut:

Q: ZON_EBIKE

Datengrundlage: Ausschnitt aus dem KVM-AG

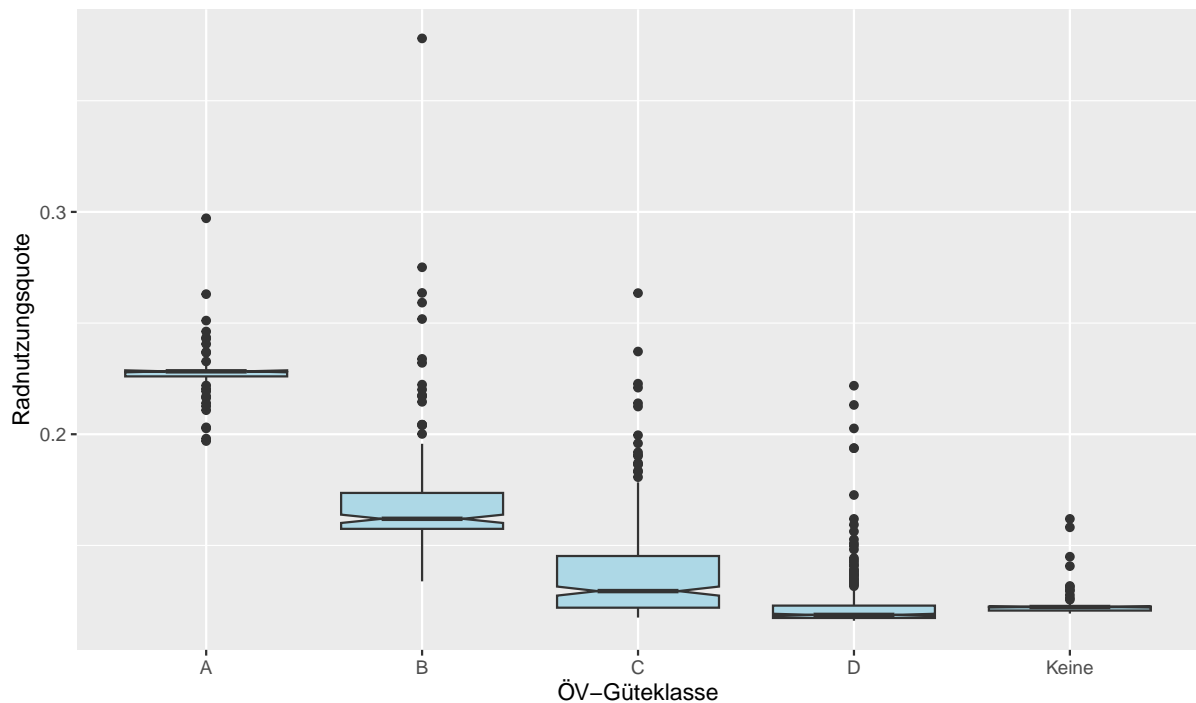
Zur Überprüfung des Einbaus werden die Nutzungsquoten aller Zonen nach dem grössten Anteil der ÖV-Gütekategorie gruppiert und ausgewertet. Dies insbesondere daher, dass je nach Verteilung die Nutzungsquote unbrauchbar werden könnte. Die Auswertung für die E-Bikes ergibt, dass die Nutzungsquote trotz der Gewichtung der vorgegeben Grössenordnung folgen.

Abbildung 30: Nutzungsquoten E-Bike nach Gewichtung und Einbau ins KVM-AG, sortiert nach dominierender ÖV-Güteklasse



Die Velo-Nutzungsquote verfolgt ebenfalls die vorgegebenen Nutzungsquoten. Aufgrund der grösseren Differenz zwischen den Werten der Nutzungsquoten, sind diese auch in den einzelnen Güteklassen besser unterscheidbar.

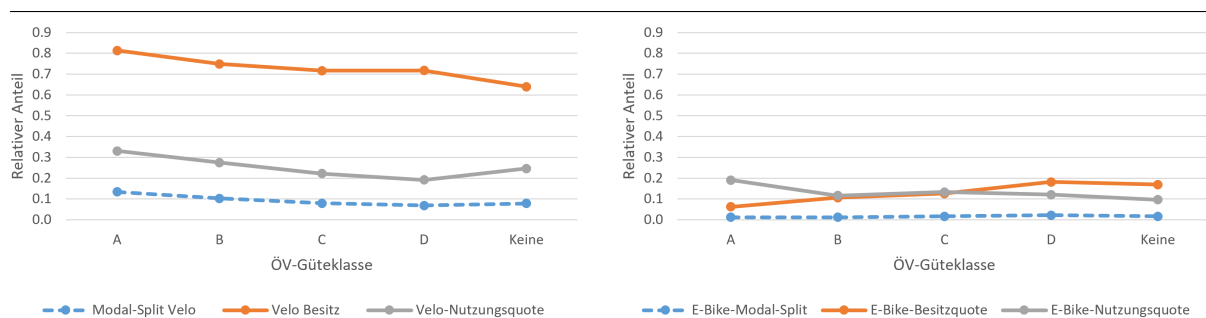
Abbildung 31: Nutzungsquoten Velo nach Gewichtung und Einbau ins KVM-AG, sortiert nach dominierender ÖV-Güteklasse



3.5.3 Interpretation und Bewertung

Die Auswertung der Nutzungsquote nach ÖV-Güteklasse zeigt, dass beide Nutzungsquoten mit abnehmender ÖV-Güteklasse tendenziell rückläufig sind mit Ausnahme der Klasse «Keine» (graue Linie Abb. 32). Trotz der hohen Besitzrate wird ein Velo im Verhältnis weniger oft genutzt als ein E-Bike. Beim E-Bike ist die hohe Nutzungsquote bei der ÖV-Güteklasse «A» hervorzuheben. Die Nutzungsquote verdeutlicht, dass die Besitzquote alleine nicht als Erklärung für die Verwendung des Verkehrsmittels genügt. Während die Besitzquoten und Nutzungsquote beim Velo nach ÖV-Güteklasse leicht abnehmen, ist es beim E-Bike umgekehrt. Die Besitzquote steigt mit abnehmender ÖV-Güteklasse. Die Nutzungsquote hingegen verhält sich ähnlich wie beim Velo und nimmt tendenziell ab. Gleichzeitig liegt beim E-Bike die Nutzungsquote für alle Stufen der ÖV-Güteklasse deutlich tiefer als beim Velo.

Abbildung 32: Besitzquote, Modalsplit und Nutzungsquote von Velos (links) und E-Bikes (rechts)



Datengrundlage:

MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023)

Besitzquote: Beobachtungen im Kt. AG

Modalsplit: Gesamtes inländische Modellgebiet KVM-AG

4 Modellintegration und Kalibrierung

Der Einbau der einzelnen Modellerweiterungen erfolgt schrittweise. Durch Funktionstests wird die Funktionsweise der einzelnen Erweiterungen geprüft. Dadurch kann einfach nachvollzogen werden, wie empfindlich die einzelnen Erweiterungen das Modell beeinflussen. Auf Grundlage der ersten Erfahrungen beim Einbau wird eine Kalibrierungskaskade ausgearbeitet. Für die Kalibrierung werden zuerst seriell die Modalsplits angepasst und im Anschluss die Distanzverteilungen. Beim Modalsplit wird der Radverkehr auf zwei Raumgrössen kalibriert. Zum einen auf die Raumtypenbeziehungen, zum anderen die ÖV-Güteklassen. Die anderen Modi werden nicht weiter betrachtet und daher belassen.

Für den ersten Kalibrierungsdurchlauf wird eine Differenz kleiner 0,5% vom beobachteten Modalsplit anvisiert. Eine genauere Annäherung an die Messwerte sind aufgrund der zuvor dargestellten Konfidenzintervalle nicht erstrebenswert (Tab. 4). Als Abbruchkriterium sind maximal 10 Iterationen pro Kalibrierungsdurchlauf vorgesehen. Für die Distanzverteilung wird ein Bestimmtheitsmass von grösser 0,95 anvisiert oder maximal fünf Iterationen.

Im Anschluss an den seriellen Kalibrierungsdurchlauf erfolgt eine weitere Runde, in welchem die Auswirkungen der ersten Kalibrierungen auf die vorherigen Stufen untersucht werden. In diesem Durchlauf werden alle Modellteile gleichzeitig untersucht und jeweils diejenige kalibriert, welche die grössten Abweichungen aufweist.

4.1 Raumtypenbeziehung

4.1.1 Grundlage

Ziel der Kalibrierung der Raumtypenbeziehungen ist es, die Nutzung der Fahrräder in den verschiedenen Modellräumen realitätsnah abzubilden. Die Grundlage zur Kalibrierung liefert der MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023). Die Integration der Raumtypenzuordnung der Zonen erfolgte bereits im Rahmen des testweisen Einbaus der Knotendichte (Abschnitt 3.4.5) und wird an dieser Stelle nicht wiederholt.

Aufgrund der geringen Anzahl an Beobachtungen im MZMV wird das gesamte Modellgebiet ausgewertet. Für die Kalibrierung wird ein Schwellenwert von 50 Beobachtungen angenommen. Aus diesem Grund werden die Beziehungen *Ausserhalb - Kern* und *Ausserhalb - Umland* nicht verwendet (Tab. 5).

Als Referenzzustand dient der angepasste Modellzustand, der das E-Bike als eigener Modus sowie die aktualisierten Radgeschwindigkeit und den neuen Steigungsfaktor verwendet. Da die Berücksichtigung der Knotendichte keine Verbesserung der Aussagekraft ermöglicht, wird diese nicht berücksichtigt. Die existierende Velo-Affinität wird übernommen und auch auf das neue Verkehrsmittel E-Bike übertragen. Der Referenzzustand enthält folglich für das E-Bike dieselbe Affinität wie für das Velo.

Tabelle 5: Modalsplit nach Raumtypenbeziehung im Gebiet KVM-AG

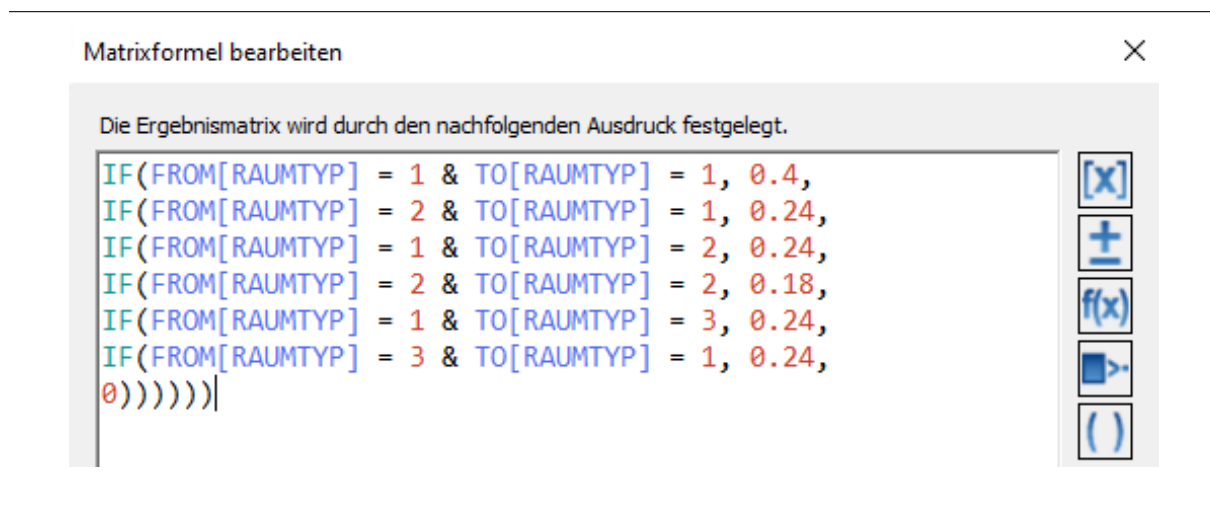
Beziehung	Modalsplit					Anz. Beob.	
	E-Bike	Fuss	MIV	Velo	ÖV	E-Bike	Velo
Genügend Beobachtungen							
Kern - Kern	1,3%	49,7%	16,6%	13,6%	18,8%	113	980
Kern - Umland	1,6%	4,6%	52,0%	8,3%	33,5%	69	358
Umland - Umland	1,8%	35,9%	47,3%	9,2%	5,9%	176	1105
Ausserhalb - Ausserhalb	1,9%	30,5%	55,8%	9,5%	2,3%	97	511
Ungenügende Anzahl							
Ausserhalb - Kern	0,8%	1,1%	68,2%	2,6%	27,3%	16	39
Ausserhalb - Umland	1,1%	1,9%	85,2%	2,8%	9,0%	30	82

MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023) gruppiert nach eigener Raumgliederung, basierend auf den Raumgliederungen des Bundesamts für Statistik BFS (2025)

4.1.2 Kalibrierung

Für die Kalibrierung auf Raumtypenebene wird die existierende Velo-Affinität durch eine neue, nach Raumtypenbeziehung differenzierte Affinität ersetzt. Ziel der ersten Kalibrierung ist eine Annäherung des Modalsplits an die Werte des MZMV von 2021 (BFS und ARE, 2023). Der aktualisierte Modalsplit im Modell basiert auf demselben Datensatz und nach demselben ausgewertetem Gebiet. Die Kalibrierung erfolgt über die Datenmatrizen Velo- und E-Bike-Affinität (Nr. 278 und 279). Die Anpassung erfolgt mithilfe einer Matrixformel (siehe Abb. 33).

Abbildung 33: Matrixformel für Velo- und E-Bike-Affinität



4.1.3 Auswertung

Der erste Kalibrierungsdurchlauf auf Raumtypenebene verlief aufgrund der direkten Implementierung über die Matrixformel einwandfrei. Nach zehn Iterationen konnte eine hinreichende Annäherung an die Referenzwerte des MZMV erreicht werden. Nach dem ersten vollständigen Kalibrierungsdurchlauf («nach 1. Runde Kalibrierung» Abb. 34) verschiebt sich der Modalsplit nur geringfügig. Die Nachkalibrierung diente daher der weiteren Annäherung der Modellwerte an den MZMV. Der Zustand «ohne Affinität» verdeutlicht hingegen, dass die Velo- und E-Bike-Affinitäten modelltechnisch notwendig sind, um die gewünschte Verteilung im Raum abzubilden (Tab. 34).

Abbildung 34: Kalibrierung nach Raumtypenbeziehung

Raumtypenbeziehung	Modal-Split-Anteile				
	Fuss	MIV	Velo	E-Bike	ÖV
Kern → Kern					
MZMV von 2021	49.69%	16.62%	13.61%	1.33%	18.75%
KVM-AG 2022 (Original)	36.97%	14.94%	20.60%		27.49%
Referenzzustand	37.10%	15.04%	19.39%	0.92%	27.55%
ohne Affinität	42.03%	18.00%	8.42%	1.10%	30.45%
10. Iteration Raumtyp-Affinität	39.43%	16.29%	13.72%	1.30%	29.26%
Nach 1. Runde Kalibrierung	39.14%	16.30%	14.28%	1.32%	28.97%
3. Nachkalibrierung	39.46%	16.53%	13.56%	1.26%	29.19%
Kern → Umland					
MZMV 2021	4.63%	52.03%	8.25%	1.63%	33.46%
KVM-AG 2022 (Original)	4.99%	57.24%	5.75%	0.00%	32.03%
Referenzzustand	4.81%	55.85%	6.40%	1.58%	31.37%
ohne Affinität	4.55%	56.69%	7.89%	1.56%	29.31%
10. Iteration Raumtyp-Affinität	4.48%	55.11%	9.05%	1.65%	29.71%
Nach 1. Runde Kalibrierung	4.55%	54.84%	8.97%	1.67%	29.96%
3. Nachkalibrierung	4.60%	55.41%	8.35%	1.58%	30.05%
Ausserhalb → Ausserhalb					
MZMV 2021	30.50%	55.79%	9.48%	1.93%	2.30%
KVM-AG 2022 (Original)	37.26%	51.12%	7.36%	0.00%	4.27%
Referenzzustand	36.45%	50.49%	6.79%	2.11%	4.16%
ohne Affinität	33.01%	47.94%	13.47%	1.99%	3.59%
10. Iteration Raumtyp-Affinität	34.96%	49.61%	9.73%	1.87%	3.83%
Nach 1. Runde Kalibrierung	35.13%	49.79%	9.33%	1.88%	3.87%
3. Nachkalibrierung	34.84%	49.60%	9.87%	1.86%	3.82%
Umland - Umland					
MZMV 2021	35.88%	47.25%	9.18%	1.82%	5.87%
KVM-AG 2022 (Original)	35.22%	48.63%	8.64%	0.00%	7.51%
Referenzzustand	34.42%	47.94%	8.32%	1.97%	7.35%
ohne Affinität	32.01%	46.02%	13.56%	1.88%	6.54%
10. Iteration Raumtyp-Affinität	33.76%	47.85%	9.56%	1.82%	7.01%
Nach 1. Runde Kalibrierung	33.78%	47.85%	9.54%	1.80%	7.03%
3. Nachkalibrierung	33.88%	48.06%	9.24%	1.74%	7.08%

4.2 Nach ÖV-Gütekategorie differenzierte Radnutzungsquote

4.2.1 Grundlage

Die Kalibrierung der nach ÖV-Gütekategorie differenzierten Radnutzungsquote basiert auf derselben Grundlage des MZMV 2021 (BFS und ARE, 2023), wie sie bereits im Zusammenhang mit dem Einbau der Radnutzungsquote beschrieben wurde (Abschnitt 3.5). Dabei dient die Modellversion nach der Kalibrierung auf Raumtypenbeziehungen als Referenzzustand («Referenzzustand (nach Raumtypenkal.)» Abb. 36). Im ersten Kalibrierungsdurchlauf erfolgt die Anpassung über die Transformationsfunktion. Diese geschieht direkt im Formelattribut, mit welcher die Nutzungsquote über einen Faktor und Konstante transformiert wird.

4.2.2 Kalibrierung

Für die Kalibrierung wird zuerst mit den vorhandenen Steilheitsparameter a und Konstante b gearbeitet. Diese ermöglichen eine Teilverbesserung der Modellergebnisse. Jedoch existieren nach zehn Iterationen nach wie vor Differenzen zwischen Modell und Beobachtung. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Nachkalibrierung ein Korrekturfaktor eingeführt (Formel mit Hilfsgrösse Abb. 35), welche die Nutzungsquote jeder Gütekategorie erhöhen oder verringern kann. Somit besteht das Formelattribut neu aus den zwei Variablen sowie einem Korrekturfaktor pro ÖV-Gütekategorie.

Abbildung 35: Formel mit Hilfsgrößen für Attribut Nutzungsquotenaffinität E-Bike

```
Formel für Attribut 'ZONE;ZON_EBIKE' bearbeiten
IF([B_FUNKTIONALERÄUME] > 0, (
[OEV_A] * ( 0.011885 / 0.06425447) * 0.96 +
[OEV_B] * ( 0.012286 / 0.07496034) * 0.92 +
[OEV_C] * ( 0.016797 / 0.10773573) * 1.00 +
[OEV_D] * ( 0.021922 / 0.12069162) * 1.40 +
[OEV_KEINE] * ( 0.016240 / 0.13897331) * 1.19 )
* 3.3 + 0.028,
1)

```

Mit diesem ist es möglich nach vier Iterationen in der Nachkalibrierung die gewünschte Genauigkeit zu erreichen (Abb. 36).

Abbildung 36: Kalibrierung nach ÖV-Güteklasse

ÖV-Güteklasse	Modal-Split-Anteile				
	Fuss	MIV	Velo	E-Bike	ÖV
A					
MZMV 2021	42.86%	22.86%	13.45%	1.19%	19.64%
KVM-AG 2022 (Original)	30.09%	46.54%	9.75%	0.00%	13.62%
Referenzzustand (nach Raumtypenkal.)	29.67%	46.30%	8.61%	2.08%	13.34%
10. Iteration (ohne Hilfsgrösse)	27.71%	45.32%	13.31%	0.99%	12.67%
Nach vollständiger Kalibrierung	27.65%	45.31%	13.40%	0.99%	12.65%
4. Nachkalibrierung (mit Hilfsgrösse)	27.49%	45.21%	13.53%	1.24%	12.52%
B					
MZMV 2021	33.97%	37.56%	10.31%	1.23%	16.93%
Original	23.31%	59.60%	7.78%	0.00%	9.31%
Referenzzustand (nach Raumtypenkal.)	22.56%	58.81%	7.12%	2.47%	9.03%
10. Iteration (ohne Hilfsgrösse)	21.53%	58.15%	10.29%	1.39%	8.64%
Nach vollständiger Kalibrierung	21.53%	58.08%	10.32%	1.39%	8.69%
Nach Nachkal. Raumtyp	21.49%	58.01%	10.44%	1.39%	8.67%
4. Nachkalibrierung (mit Hilfsgrösse)	21.47%	57.83%	10.45%	1.57%	8.67%
C					
MZMV 2021	26.07%	52.02%	7.95%	1.68%	12.29%
Original	24.12%	58.58%	8.42%	0.00%	8.87%
Referenzzustand (nach Raumtypenkal.)	23.56%	57.41%	7.84%	2.58%	8.61%
10. Iteration (ohne Hilfsgrösse)	23.16%	57.60%	9.14%	1.79%	8.31%
Nach vollständiger Kalibrierung	23.17%	57.51%	9.15%	1.80%	8.37%
Nach Nachkal. Raumtyp	23.13%	57.46%	9.27%	1.80%	8.34%
4. Nachkalibrierung (mit Hilfsgrösse)	23.54%	58.20%	8.04%	1.75%	8.46%
D					
MZMV 2021	22.10%	60.04%	6.89%	2.19%	8.77%
Original	21.45%	65.72%	6.63%	0.00%	6.19%
Referenzzustand (nach Raumtypenkal.)	20.92%	64.24%	6.24%	2.61%	5.99%
10. Iteration (ohne Hilfsgrösse)	20.19%	63.88%	8.18%	2.06%	5.69%
Nach vollständiger Kalibrierung	20.27%	63.74%	8.14%	2.08%	5.77%
4. Nachkalibrierung (mit Hilfsgrösse)	20.57%	64.46%	7.01%	2.12%	5.84%
Keine					
MZMV 2021	17.81%	65.63%	7.89%	1.62%	7.04%
Original	19.39%	68.57%	6.08%	0.00%	5.96%
Referenzzustand (nach Raumtypenkal.)	18.90%	67.06%	5.70%	2.60%	5.74%
10. Iteration (ohne Hilfsgrösse)	18.32%	66.48%	7.89%	1.86%	5.45%
Nach vollständiger Kalibrierung	18.41%	66.32%	7.84%	1.89%	5.54%
4. Nachkalibrierung (mit Hilfsgrösse)	18.48%	66.66%	7.74%	1.57%	5.56%

4.2.3 Auswertung und Interpretation

Nach der Kalibrierung hat sich die Nutzungsquote für E-Bikes und Velos aufgrund der Korrekturfaktoren verändert. Verglichen mit den Ursprungsgrößen aus der Datengrundlage, sind teilweise doch grössere Korrekturfaktoren notwendig, um im Modell die gewünschte Wirkung zu erreichen. Die Kalibrierung zeigt in den E-Bike-Nutzungsquoten auf, dass in der ÖV-Güteklasse D die höchste Nutzungsquote vorhanden ist. Aufgrund der geringen Beobachtungszahl sind solche Ableitungen aus den Kalibrierungsergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren. Insbesondere da die Daten des MZMV die höchste Nutzungsquoten bei der ÖV-Güteklasse A zeigt.

Tabelle 6: Vgl. E-Bike-Nutzungsquote vor und nach der Kalibrierung

ÖV-Güteklasse	E-Bike-Nutzungsquote		Affinitätsfaktor nach Kalibrierung
	vor Kalibrierung	nach Kalibrierung	
A	0,191	0,178	0,614
B	0,116	0,151	0,526
C	0,133	0,156	0,543
D	0,120	0,254	0,867
Keine	0,096	0,139	0,487

Bei der Velo-Nutzungsquote ist festzustellen, dass die Korrekturfaktoren die existierenden Quoten erhöhen mit Ausnahme der ÖV-Güteklasse D. Der Radaffinitätsparameter sorgt dafür, dass im Modell das Velo in der ÖV-Güteklasse A überdurchschnittlich häufig gewählt wird.

Tabelle 7: Vgl. Velo-Nutzungsquote vor und nach der Kalibrierung

ÖV-Güteklasse	Velo-Nutzungsquote		Affinitätsfaktor nach Kalibrierung
	vor Kalibrierung	nach Kalibrierung	
A	0,165	0,244	0,884
B	0,138	0,183	0,712
C	0,111	0,118	0,530
D	0,096	0,093	0,460
Keine	0,123	0,162	0,653

Es gilt einzuordnen, dass möglicherweise eine andere Transformationsfunktion die Notwendigkeit der Korrekturfaktoren überflüssig machen könnte. Da hier mit einer linearen Funktion gearbeitet wird, erscheint der Korrekturfaktor soweit als geeignet, um die Modellergebnisse jenen des MZMV anzunähern. Zudem kommt selten in einer Zone nur eine ÖV-Güteklasse zum Tragen. Meist ist daher die tatsächliche Nutzungsquote eine Mischung aus den gezeigten Werten. Zudem scheint aufgrund der Affinitätsfaktoren mit allesamt Werten kleiner 1 ein Teil der vorherigen Raumtypenkalibrierung kompensiert zu werden.

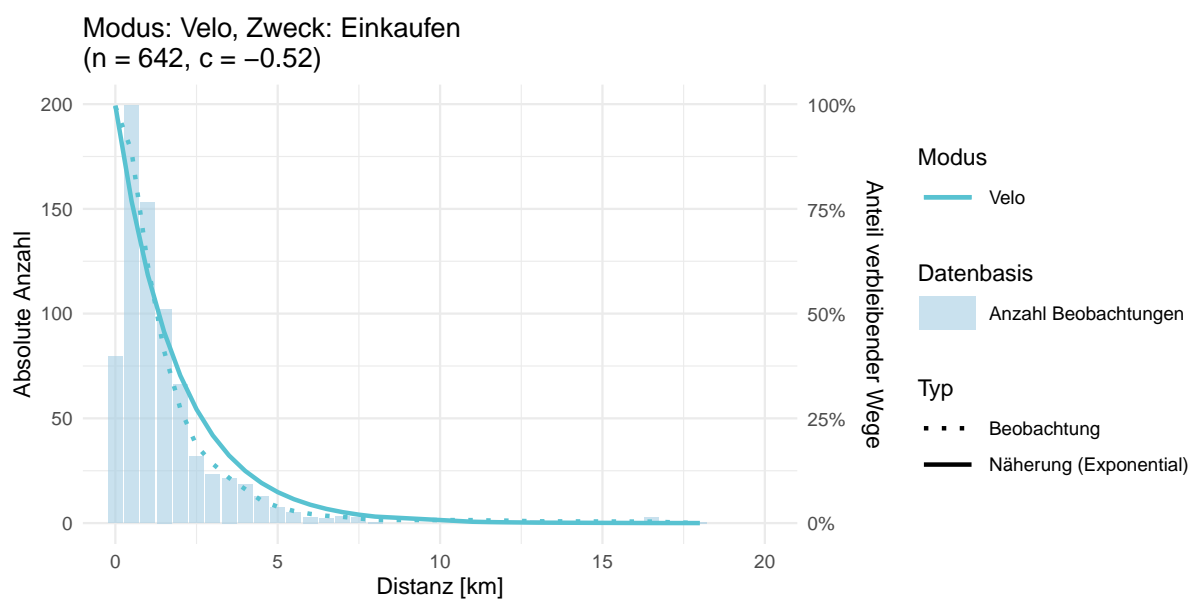
4.3 Distanzverteilung

4.3.1 Grundlage

Für die Kalibrierung der Distanzverteilung wird der MZMV-Datensatz von 2021 herangezogen, welcher bereits bei der Aktualisierung des Modalsplits genutzt wurde. Damit wird eine durchgehende methodische Konsistenz über alle Stufen hinweg gewährleistet. Wie bereits bei der Aktualisierung des Modalsplits festgestellt (Abschnitt 3.3), stimmen die Nachfrageschichten des KVM-AG nicht durchgehend mit den Kategorien des MZMV überein. Deshalb werden ausschliesslich Reisezwecke kalibriert, die eindeutig zuordenbar sind und mindestens 100 Beobachtungen besitzen.

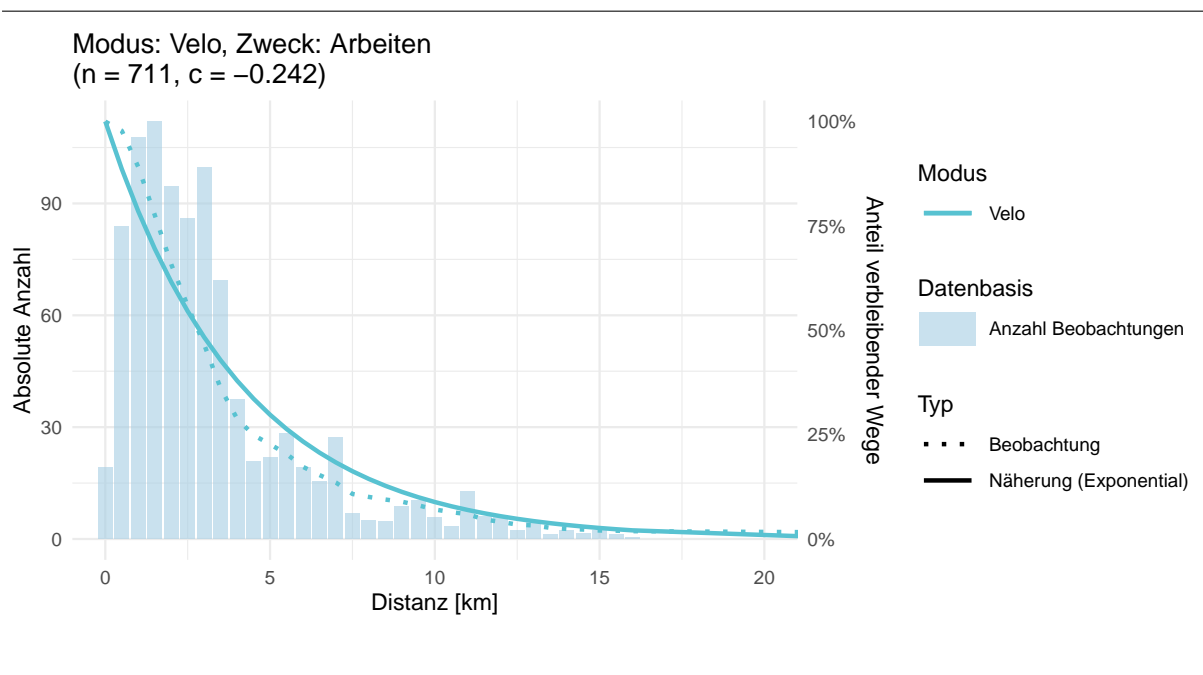
Die Auswertung nach Wegzweck belegt, dass die Distanzverteilungen je nach Zweck deutlich variieren. Die bereits im Modell vorhandene Differenzierung nach Nachfrageschichten ist somit methodisch nachvollziehbar und rechtfertigt den Mehraufwand (vgl. Abb. 37 und Abb. 38).

Abbildung 37: Auswertung MZMV für Modus Velo nach Zweck Einkaufen



Datengrundlage: MZMV von 2021, BFS und ARE, 2023
Nur Wege mit Start und Ziel innerhalb Modellgebiet KVM-AG

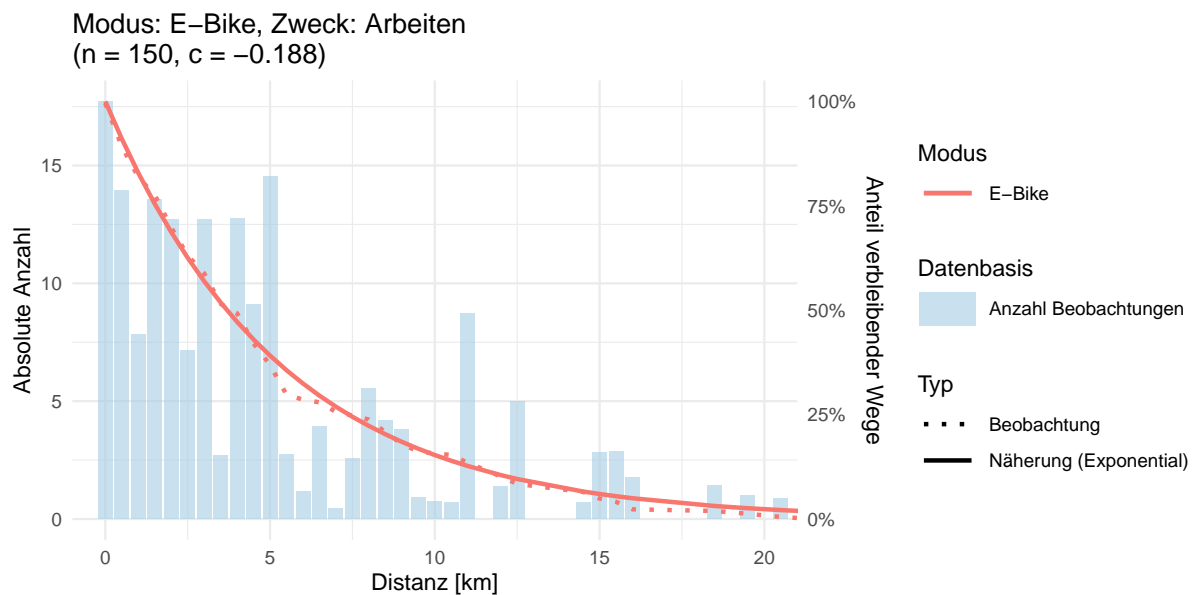
Abbildung 38: Auswertung MZMV für Modus Velo nach Zweck Arbeiten



Datengrundlage: MZMV von 2021, BFS und ARE, 2023
Nur Wege mit Start und Ziel innerhalb Modellgebiet KVM-AG

Ebenso erweist sich die Differenzierung der Radtypen als sinnvoll, wobei insbesondere beim Zweck Arbeiten fast 4 Kilometer mehr Distanz abgedeckt wird bei 95% aller Distanzen (vgl. Abb. 38 und Abb. 39).

Abbildung 39: Auswertung MZMV für Modus Velo nach Zweck Arbeiten



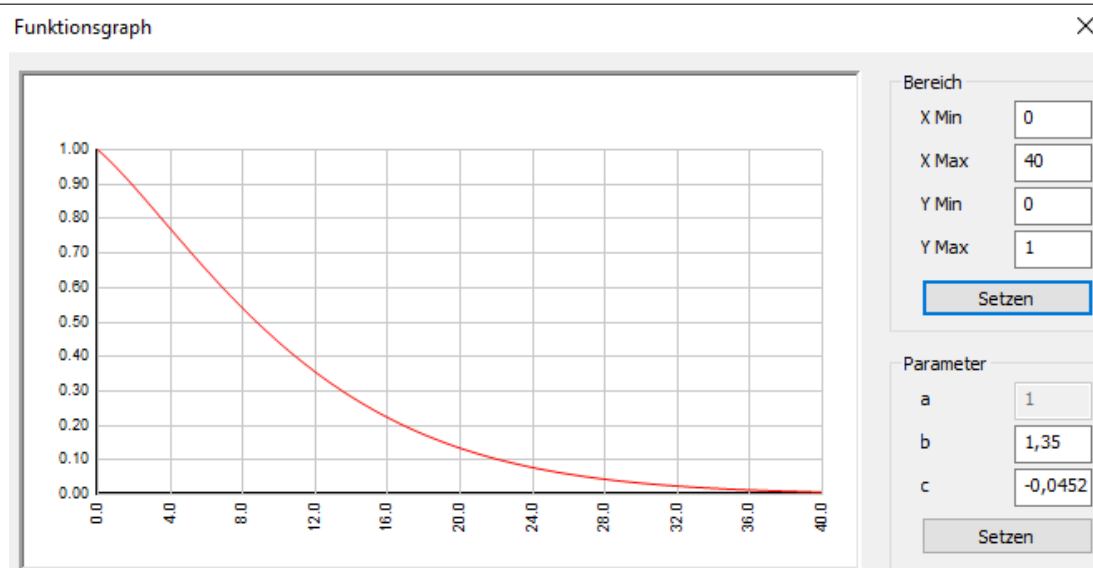
Datengrundlage: MZMV von 2021, BFS und ARE, 2023

Nur Wege mit Start und Ziel innerhalb Modellgebiet KVM-AG

4.3.2 Kalibrierung

Für die Kalibrierung werden die Nachfrageschichten Arbeiten, Bildung, Einkaufen und Freizeit angepasst. Die restlichen Nachfrageschichten konnten entweder nicht eindeutig zugeordnet werden oder weisen eine zu geringe Anzahl Beobachtungen auf. Die Kalibrierung erfolgt direkt über die Widerstandsfunktion der Reisezeit im Modell. Im KVM-AG wird dies mittels einer Box-Tukey-Funktion implementiert, welche die Reisezeit transformiert (Abb. 40). Im KVM-AG werden unter anderem die Zwecke Einkaufen und Freizeit in kurze und lange unterschieden. Für die Auswertung werden jeweils beide Nachfrageschichten eines Zweckes «kurz» und «lang» zusammen ausgewertet. Die Kalibrierung erfolgt jeweils auf der entsprechenden Widerstandsfunktion, abhängig davon, ob eher die kurzen, langen oder beide Distanzen betroffen sind.

Abbildung 40: Transformationsfunktion der Reisezeit mittels Box-Tukey

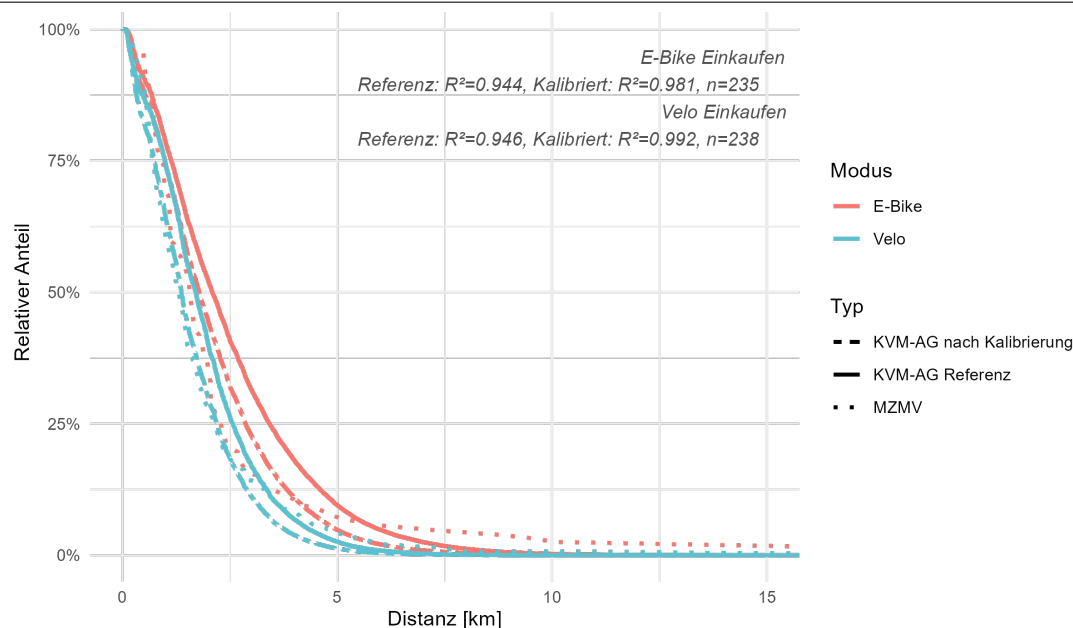


Datengrundlage: MZMV von 2021, BFS und ARE, 2023

4.3.3 Auswertung

Die Kalibrierung verläuft effizient, da die Parameter aufgrund der Box-Tukey-Funktion direkt anpassbar sind. Bereits nach vier Iterationen wird das gewünschte Bestimmtheitsmass erreicht ($R^2 > 0,95$). Die Anpassung erfolgte für alle zur Kalibrierung geplanten Zwecke, exemplarisch ist der Zweck «Einkaufen» abgebildet (Abb. 41). Als Referenz dient die Modellversion nach der ersten Kalibrierung der Raumtypen sowie der ÖV-Güteklasse.

Abbildung 41: Kalibrierung Reisedistanz für Zweck Einkaufen



Datengrundlage:

MZMV: MZMV von 2021, BFS und ARE, 2023

KVM-AG: Eigene Anpassung basierend auf dem Ursprungsmodell von BVU AVK, 2024

4.4 Streckenspezifischer Wahrnehmungsfaktor

4.4.1 Grundlage

Nach der Kalibrierung wird im Umlegungsmodell die Auswirkung einer Umstellung des MIV-Faktors auf den überarbeiteten Faktor erprobt. Dies erfolgt, wie zuvor beschrieben, nach der Kalibrierung, um mögliche Interferenzen bei der Kalibrierung auszuschliessen und dem damit einhergehende Risiko durch das Verwerfens dieses Einbaus zu verringern. Durch den Einbau wird direkt im Nachfragemodell keine Modifikationen vorgenommen. Sowohl der bestehende wie auch der neue Faktor existieren rein im Umlegungsmodell, haben jedoch aufgrund der Auswirkung auf den Radwiderstand einen Einfluss ins Nachfragemodell. Da für die Umlegungsergebnisse keine Datengrundlage (z.B. Übereinstimmung mit Zählstellen) vorhanden ist, wird der Einbau rein qualitativ beurteilt. Eine Kalibrierung wird nicht vorgenommen werden.

4.4.2 Einbau

Da der Einbau ins KVM-AG wie zuvor beschrieben, vorerst aufgeschoben wurde, wird der technische Einbau an dieser Stelle erläutert. Über das existierende Formelattribut *WIDERSTAND MIV* wird die zuvor dargestellt Formel umgesetzt. Da es sich um zwei verschiedene Radty-

pen handelt, werden zwei Attribute eingebaut: *VELO WIDERSTAND MIV* und *EBIKE WIDERSTAND MIV*.

In der konkreten Umsetzung werden ebenfalls die Ausnahmen sowie Redundanzen eingebaut, um fehlerhafte Auswertungen zu vermeiden. Dazu gehört untere anderem die Aufteilung der Geschwindigkeitsdifferenz in drei Formelteile, um negative Belastungsdifferenzen zu verhindern. Ein Einbau über Kategorisierung von Höchstgeschwindigkeit und Führungsform würde in PTV-Visum zu einer sehr komplexen Formelbeschreibung führen, da eine Reihe von Bedingungen definiert werden müssten (Verkettung von Wenn-Optionen). Durch die gewählte Art der Beschreibung des MIV-Belastungsfaktor kann diese Kette minimiert werden.

Abbildung 42: Überarbeitete MIV-Faktor-Formel (E-Bike) im KVM-AG

Formel bearbeiten

Formel für Attribut 'LINK;EBIKE_WIDERSTAND_MIV' bearbeiten

```
IF([VELO_CODE] = 1, 0.91,
IF([VØIV]=0, 1.0,
IF([VØIV]=[EBIKE_GESCHWINDIGKEIT], 1.0,
IF([VØIV]>[EBIKE_GESCHWINDIGKEIT],

([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN] + ([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-
BELASTUNG_MAX] - [NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN])
* 1 / (1 + exp(-[NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_A] * ([BEL_MIV] -
([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_B]/(
IF([VØIV]-([EBIKE_GESCHWINDIGKEIT]+2)=0, 1.0,
[VØIV]
-([EBIKE_GESCHWINDIGKEIT]+IF([VELO_CODE] = 2, [VELO_CODE], 0)))
)))))),
IF([VØIV]<[EBIKE_GESCHWINDIGKEIT],

([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN] + ([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-
BELASTUNG_MAX] - [NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN])
* 1 / (1 + exp(-[NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_A] * ([BEL_MIV] -
([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_B]/(
IF([VØIV]-([EBIKE_GESCHWINDIGKEIT]+2)=0, 1.0,
([EBIKE_GESCHWINDIGKEIT]+IF([VELO_CODE] = 2, [VELO_CODE], 0)))-[VØIV])
)))))),
1.0))))))
```

Der Bonus bei Radwegen entsteht durch eine Konsolidierung von Geschwindigkeitsformel und MIV-Faktor. Im Originalmodell wird in beiden Formeln der Radweg berücksichtigt (vgl. Formel 8 und Abb. 3). Zum einen durch die benötigte Höchstgeschwindigkeit und auf der anderen Seite durch das Wegfallen der MIV-Belastung. Durch das Zusammenfassen im streckenspezifischen Wahrnehmungsfaktor kann die Geschwindigkeitsformel vereinfacht werden. In der Folge sind nun alle Effekte der Führungsform in einer Formel zusammengefasst.

4.4.3 Auswertung Nachfragemodell

Der reine Einbau hat im Nachfragemodell minimale Auswirkungen. Die grösste beobachtete Abweichung beträgt 0,34%-Punkte in der Raumtypenbeziehung Kern-Kern im Vergleich zur zuvor kalibrierten Referenz. Die Auswirkung ist daher kleiner als das Konfidenzintervall für dessen Kalibrierung.

Abbildung 43: Vergleich Modalsplit kalibrierte Version ohne und mit neuem MIV-Faktor

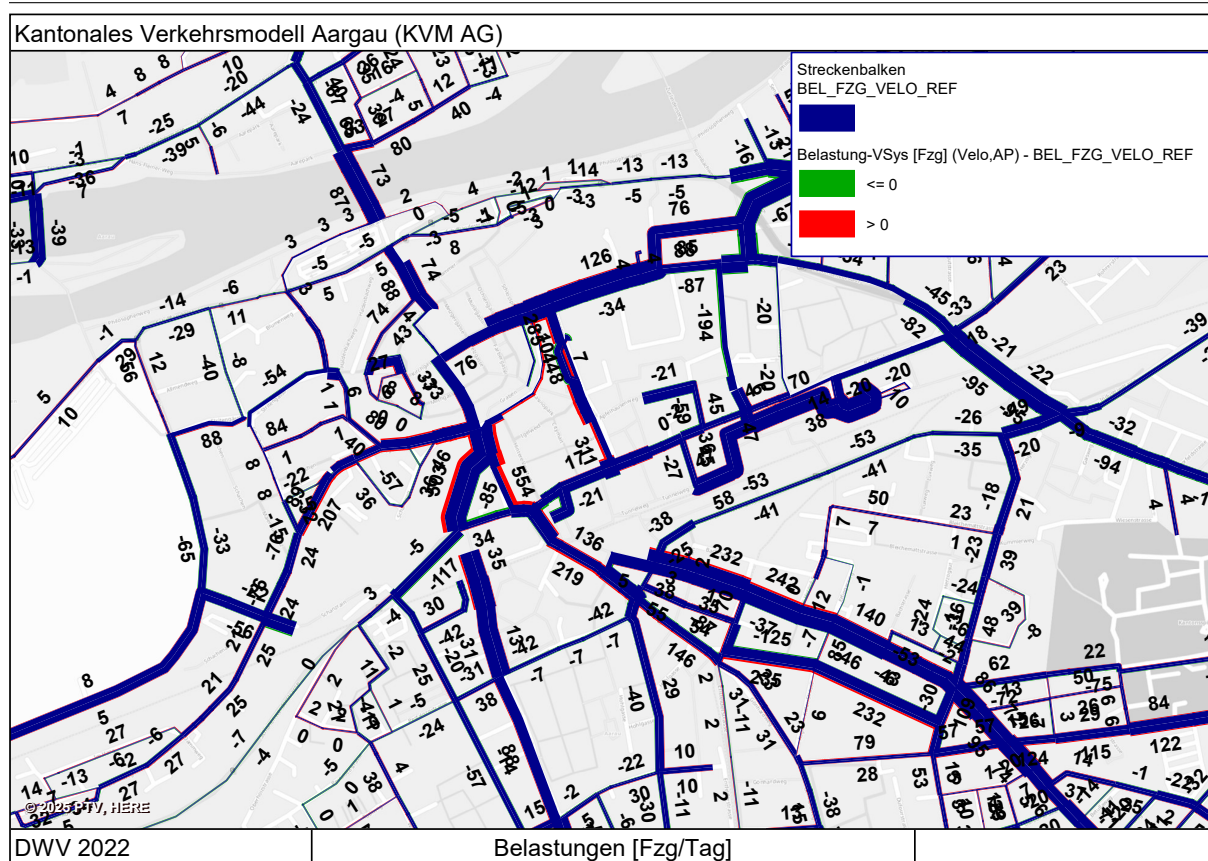
Raumtypenbeziehung	Modal-Split-Anteile				
	Fuss	MIV	Velo	E-Bike	ÖV
Kern → Kern					
MZMV von 2021	49.69%	16.62%	13.61%	1.33%	18.75%
Referenz mit erweitertem MIV-Faktor	39.34%	16.45%	13.90%	1.21%	29.11%
Referenzzustand (kalibriert)	39.46%	16.53%	13.56%	1.26%	29.19%
Kern → Umland					
MZMV 2021	4.63%	52.03%	8.25%	1.63%	33.46%
Referenz mit erweitertem MIV-Faktor	4.60%	55.31%	8.33%	1.70%	30.06%
Referenzzustand (kalibriert)	4.60%	55.41%	8.35%	1.58%	30.05%
Ausserhalb → Ausserhalb					
MZMV 2021	30.50%	55.79%	9.48%	1.93%	2.30%
Referenz mit erweitertem MIV-Faktor	34.94%	49.77%	9.63%	1.79%	3.87%
Referenzzustand (kalibriert)	34.84%	49.60%	9.87%	1.86%	3.82%
Umland - Umland					
MZMV 2021	35.88%	47.25%	9.18%	1.82%	5.87%
Referenz mit erweitertem MIV-Faktor	33.90%	48.03%	9.27%	1.71%	7.09%
Referenzzustand (kalibriert)	33.88%	48.06%	9.24%	1.74%	7.08%

4.4.4 Auswertung Umlegungsmodell

Im Grossen und Ganzen werden die bekannten Routen beibehalten. Dies entspricht der Erwartung, da im Ursprungsmodell die MIV-Belastungen bereits bei der Routenwahl berücksichtigt werden. Zu deutlich erscheinen die direkten Verbindungen im Vergleich zu möglichen, weniger

belasteten aber indirekteren Routen.

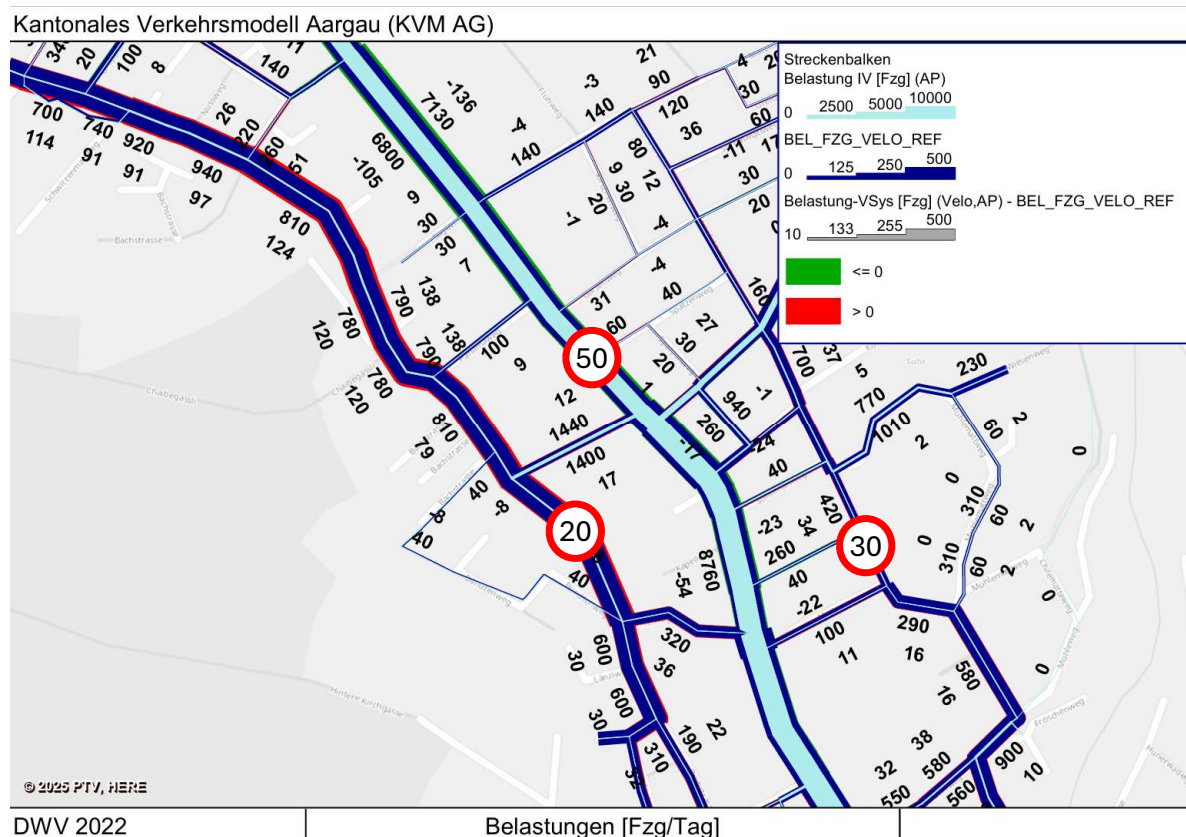
Abbildung 44: Vergleich zwischen bestehenden verkehrsmengen- und neuem strecken- und verkehrsmengen-spezifischem Wahrnehmungsfaktor am Ausschnitt Aarau (rot mehr Velonachfrage, grün weniger Velonachfrage mit neuem Ansatz)



Grössere Differenzen im Verhältnis zur bestehenden Belastung entstehen oftmals nur sehr lokal. Beispielsweise weil die Erreichung der Anbindung über eine andere Strasse nun günstiger liegt. Durch die Adaption des Streckenwahrnehmungsfaktors und deren Verknüpfung mit der Höchstgeschwindigkeit scheint das Umlegungsmodell an ausgesuchten Stellen neue Routen zu belasten. Als Beispiel dient ein Abschnitt zwischen Suhr und Aarau. Hier ist eine leichte Verschiebung weg von der Hauptstrasse (Mitte Abb. 45) nach links und rechts auf die Quartierstrassen zu beobachten. Im Modell besitzen alle aufgeführten Strecken keine Radinfrastruktur. Die Verschiebung ist überschaubar und doch nachvollziehbar, denn die Hauptstrasse ist mit einem DTV von ungefähr 7'000 Fahrzeugen gut belastet und hat gleichzeitig die Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Dennoch sind die Verschiebungen im gesamten Modell nicht sehr gross. Dies war zu erwarten, da mit dem ursprünglichen Faktor bereits die Verkehrsstärke in die Umlegung mitaufgenommen wurde. Daher sind die neuen Differenzen gering, da hochbelastete Strassen im Originalmodell wie in der Erweiterung etwa gleich unattraktiv bleiben. Die

grössten Differenzen sind in Bereichen mit mittleren Belastungen, DTV von 5'000 bis 10'000 Fahrzeuge, und unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten auszumachen. Hier führt die Anpassung des Faktors zu grösseren Verschiebungen, insofern die neue attraktivere Route nicht bereits die ursprüngliche Route ist.

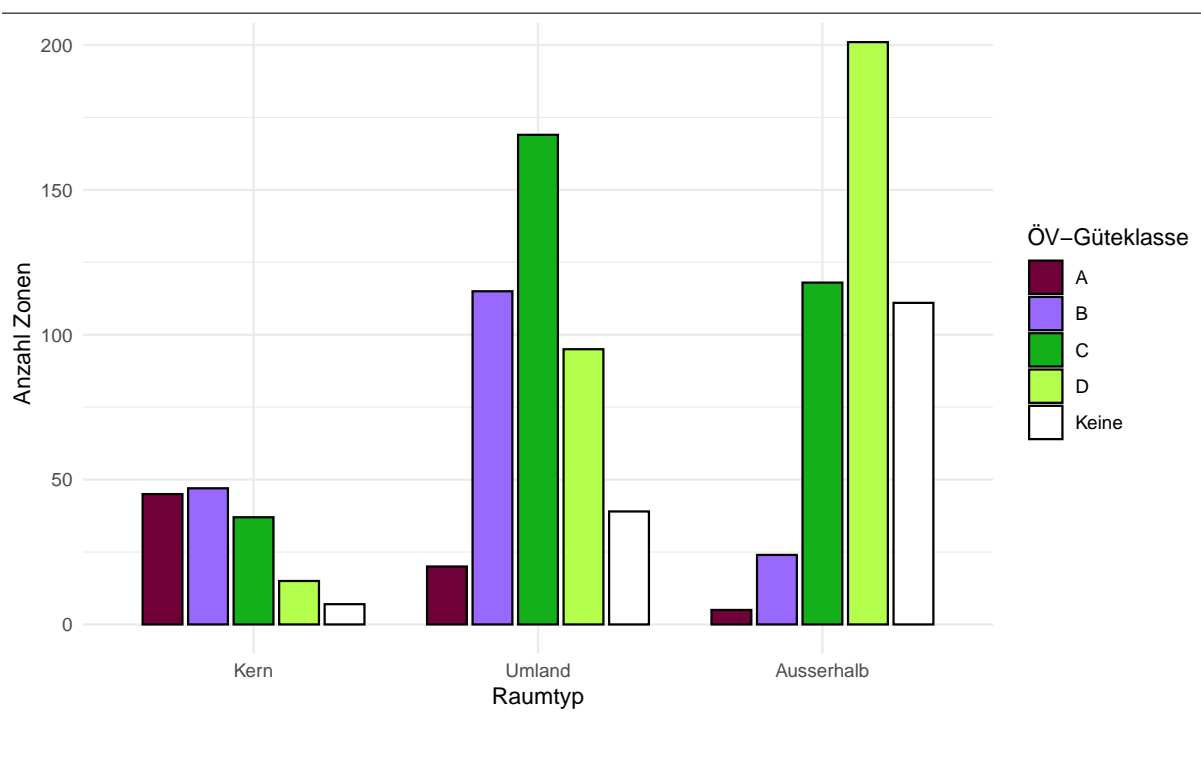
Abbildung 45: Umlegungsmodell: Vergleich zwischen bestehendem verkehrsmengen- und neuem strecken- und verkehrsmengen-spezifischem Wahrnehmungsfaktor am Ausschnitt Aarau-Suhr (rot mehr Velonachfrage, grün weniger Velonachfrage mit neuem Ansatz)



4.5 Zwischenfazit

Die gegenseitige Abhängigkeit zwischen den einzelnen Modellkomponenten und Kalibrierungsschritten werden zum Teil erst nach einer vollständigen Implementierung ins Modell sichtbar. So führt etwa die Justierung der ÖV-Güteklasse zu nicht unmittelbar vorhersehbaren Veränderungen in den Raumtypenbeziehungen (siehe «Nach 1. Runde Kalibrierung» Abb. 34). Ursächlich dürfte die Korrelation zwischen Raumtyp und der ÖV-Erschliessung sein, wie eine Auswertung der Verteilung im Modell KVM-AG aufzeigt (Abb. 46).

Abbildung 46: Zonenvergleich dominierende ÖV-Güteklasse und Raumtyp



In umgekehrter Richtung, vom Raumtyp zur ÖV-Güteklasse, konnten keine wahrnehmbaren Veränderungen ersichtlich werden. Dies lässt sich vermutlich auf zwei Ursachen zurückführen. Zum einen ist die Kalibrierung der ÖV-Güteklasse nur auf den Kanton Aargau beschränkt. Diese könnte daher von der modellweiten Kalibrierung weniger direkt betroffen sein. Zum anderen ist die Kalibrierungskaskade wohl mitverantwortlich, denn die Kalibrierung der ÖV-Güteklasse erfolgt erst nach dem Durchlauf auf Raumtypenebene.

Eine weitere Beobachtung ist, dass der Modalsplit nach Raumtypen insbesondere in den Raumtypen Kern ohne Kalibrierung zu wenig vorkommen. Dies wirft die Frage auf, ob die Auswertung des gesamten Gebietes für den Modalsplit sinnvoll ist. Das Modellgebiet umfasst grosse Städte wie Zürich und Basel. Dies ist für die Beziehungen im MIV und ÖV angebracht, da deren Distanzverteilung durchaus Relationen ausserhalb des Kantons Aargau zulassen. Hier sind 95% aller Wegdistanzen im ausgewerteten Gebiet des MZMV beim MIV unter 51,6 km und beim ÖV bei 73,6 km.

Für die Kalibrierung des Radverkehrs nach Raumtypen wird die Beziehung von Kern nach Kern durch diese Auswertungsart möglicherweise überschätzt, da im Kanton Aargau solch grosse zusammenhängende Kernstädte nicht existieren. Beim Velo und E-Bike könnte die Auswertung auf den Kanton beschränkt werden und ausserhalb bis an eine bestimmte Grenze gelten. Beispielsweise bis 95% aller beobachteten Wegdistanzen des betreffenden Modus. Diese betragen beim Velo 8.5 km und beim E-Bike 12.9 km (Datengrundlage MZMV von 2021 für Gebiet

KVM-AG). Die Auswertung für das gesamte KVM-AG-Gebiet ist aktuell alternativlos aufgrund der Datenlage.

Eine Kalibrierung des Umlegungsmodells wurde nicht durchgeführt. Es stehen kein ausreichend dichtes Zählstellennetz zur Verfügung und somit ist eine Kalibrierung der Umlegungsergebnisse unter diesen Voraussetzungen nicht möglich. Zur Einordnung ob eine Erweiterung des MIV-Faktors mit Höchstgeschwindigkeiten sinnvoll ist, kann daher keine direkte Aussage getroffen werden, da kein Vergleich der Richtigkeit der Modelle existiert. Aus modelltechnischer Sicht hat sich der bestehende Faktor bisher bewährt. Eine Ausweitung des bestehenden Faktors wird daher als sinnvoll erachtet. Der überarbeitete Faktor vereint die verschiedenen Anpassungen des Radwegs in einer Formel. Zudem ist die Formel für künftige Anpassungen geeignet wie der Einbau weiterer Radtypen oder die Ausweitung der Radverkehrsanlagen. Über den neuen Sicherheitszuschlag können beispielsweise überbreite Radstreifen oder Sicherheitstrennstreifen neu vom Modell berücksichtigt werden, welche den Einfluss des MIV minimieren.

Aus qualitativer Sicht scheint der Einbau verhältnismässig. Der Einfluss des neuen Faktors auf die Ergebnisse des Nachfragemodells sind minim. Im Umlegungsmodell ergeben sich keine deutlichen Veränderungen sondern nur leichte Wanderungen zwischen den Strecken aufgrund der Höchstgeschwindigkeit. Denn bisher wurde bereits die MIV-Belastung im Umlegungsmodell berücksichtigt, sodass hochbelastete Strassenabschnitte nicht schlagartig unattraktiv werden sondern dies bereits im Ursprungsmodell waren. Zudem besitzen aufgrund der längeren resultierenden Reisezeit im MIV in der Regel Abschnitte mit tieferen Höchstgeschwindigkeiten ohnehin weniger MIV-Belastung. Der Einbau des überarbeiteten MIV-Faktors wird daher beibehalten und dessen Wirkung in den darauffolgenden Fallbeispielen untersucht.

5 Fallbeispiele

5.1 Methodik

Im folgenden werden verschiedene Fallbeispiele erarbeitet, welche die Funktionsweise des erweiterten KVM-AG aufzeigen soll. Hierfür werden verschiedene hypothetische Szenarien verwendet, welche in naher Zukunft als Fragestellung an ein Verkehrsmodell herangetragen werden könnten. Ziel jener Szenarien ist es, Wirkungsunterschiede zwischen den jeweiligen Modellversionen zu dokumentieren und daraus Vor- und Nachteile abzuleiten sowie die Limitationen und Aussagekraft zu bewerten. Hierbei handelt es sich ausschliesslich um Massnahmen, welche den Radverkehr direkt betreffen. Explizit nicht in der Auswertung berücksichtigt werden Aussagen über die Wirkung und Sinnhaftigkeit der Massnahmen. Um die genaue Auswirkung der Massnahmen eruieren zu können, wäre ein breiterer Datensatz zur Kalibrierung notwendig. Die hier dargestellten Ergebnisse sind daher als Beispiele anzusehen und geben nicht zwangsläufig die Auswirkungen in der Realität wider.

Durch die benötigte Datengrundlage zur Erweiterung und Kalibrierung weiterer radtypenspezifischer Parameter wurde der Datensatz des MZMV 2021 herangezogen, da dieser zur Zeit die breiteste empirische Datengrundlage in der Region darstellt. Ebenso ist darin das E-Bike separat erhoben, jedoch ist aufgrund des Erhebungszeitraumes von vornherein mit einer gewissen Verzerrung der Daten respektive des beobachteten Mobilitätsverhalten zu rechnen. Zugleich beinhaltet das KVM-AG in seinem Grundzustand in grossen Teilen Daten aus dem Jahre 2015 und wurde nur in Teilen auf 2022 aktualisiert.

Aus diesem Grund ist ein direkter Vergleich der beiden Modelle ausgeschlossen. Daher kommt der *Differenz-von-Differenzen-Ansatz* (DvD) zur Anwendung. Dies ist eine weit verbreitete Methode zur Schätzung kausaler Effekte (Li, Graham und Majumdar, 2012). Die Grundidee ist, dass man zwei Gruppen zu zwei Zeitpunkten betrachtet. Hierbei dient eine Gruppe als Kontrollgruppe und die andere als Behandlungsgruppe. Die Behandlungsgruppe erfährt eine Behandlung, im Anschluss wird verglichen wie sich die Behandlungsgruppe über die Zeit verändert hat und zieht davon die Veränderung in der Kontrollgruppe ab. Diese doppelte Differenz hilft dabei, Verzerrungen auszuschliessen die aufgrund von dauerhaften Unterschieden zwischen zwei Gruppen existieren. Es soll folglich Trends ausschliessen, die nichts mit der Massnahme selbst zu tun haben.

Als Kontrollgruppe dient das ursprüngliche KVM-AG-Modell. Als Behandlungsgruppe wird das Modell mit der radtypenspezifischen Erweiterung verstanden. Anders als beim klassischen DvD-Ansatz erfolgt aber in beiden Gruppen der Einbau der Massnahme im Fallbeispiel. Durch diesen angepassten DvD-Ansatz wird sichergestellt, dass rein die Effekte der Erweiterung einen Einfluss auf die Bewertung der Fallbeispielwirkung haben und keine Unterschiede wie die erneute Kalibrierung die Einschätzung verzerren.

5.2 Modellzustand

Um in PTV Visum Fallbeispiele darzustellen, existieren verschiedene Möglichkeiten. Im vorliegenden Fall wird mit getrennten Modellversionen gearbeitet. Damit die Fallbeispiele wirken können, wird das EVA-Modell für die Fallbeispiele in den Prognosezustand geschaltet. Die Einstellung wird im Verfahrensablauf des Nachfragemodells vorgenommen. Im Schritt «EVA-Verteilung/Moduswahl» kann die Projektart von Analyse auf Prognose umgestellt werden (Abb. 47). So wird sichergestellt, dass sich der Modalsplit frei verändern kann. Wichtig ist, dass die ursprünglichen Bilanzfaktoren aus dem Analysefall verwendet werden, das Modell folglich nicht mit den Anpassungen bereits gerechnet wurde, da ansonsten die Bilanzfaktoren sich neu an diesem Zustand orientieren. Dies würde die Ergebnisse verzerren, da das Modell über die Aussenzonen gewisse Massnahmen kompensieren kann, sodass die Wirkung respektive die Fallbeispiele unvorhergesehene Auswirkungen haben kann.

Abbildung 47: Umstellung von Analyse auf Prognose in der EVA-Verteilung



Quelle: Bildschirmaufnahme aus KVM-AG Ver. 2022 in PTV Visum

Als «Originalmodell» (Kontrollgruppe) wird nachfolgend das Ursprungsmodell des KVM-AG Version 2022 beschrieben ohne jegliche Anpassungen. Als «Referenzmodell» wird das KVM-AG mit den radtypenspezifischen Erweiterungen verstanden (Behandlungsgruppe). Hierbei handelt es sich um das modifizierte und neu kalibrierte Modell.

5.3 Fallbeispiel A: Ausbau der kantonalen Velorouten zu Radwegen

5.3.1 Szenario

Der Kanton hat sich in der 2016 verabschiedeten Strategie «mobilitätAARGAU» verschiedene Ziele gesetzt, um die Stossrichtung der kantonalen Verkehrspolitik bis 2040 festzulegen. Strategie I.a sieht unter anderem vor, dass sich die Mobilitätsbedürfnisse flächeneffizient abwickeln (AVK, 2016).

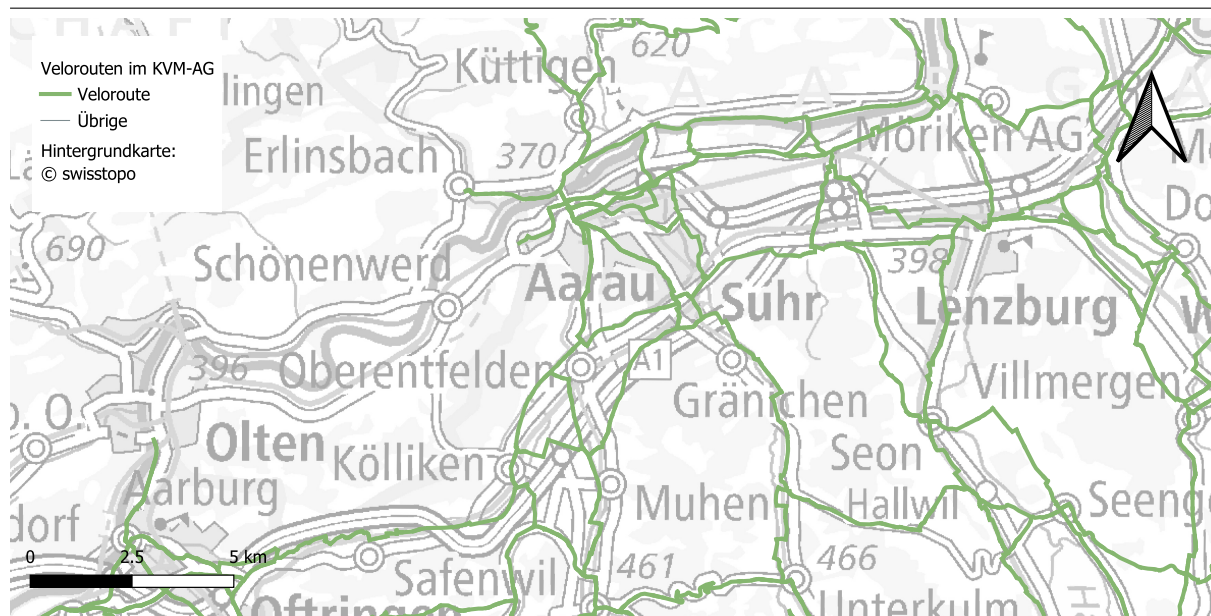
Der Standbericht wiederum prüft, ob der Kanton die nötigen Massnahmen ergriffen hat, um die gesteckten Ziele der Mobilitätsstrategie zu erreichen. Im Standbericht von 2022 (AVK, 2022) wird festgehalten, in welchen Bereichen Handlungsbedarf besteht. Der Bericht kommt zum Schluss, dass zur Erreichung des Ziels I.a ein bedeutender Handlungsbedarf im Bereich des Veloverkehrs besteht. Aufgrund mangelnder Bereitstellung von Flächen fehlt es nach wie vor an sicheren und komfortablen Routen für den Veloverkehr (AVK, 2022).

Basierend auf der Ausgangslage wird ein Fallbeispiel erarbeitet, das davon ausgeht, dass der Kanton Aargau konsequent sämtliche existierende Velorouten auf den Ausbaustandard Radweg bringt. Mit jener hypothetischen Annahme soll das Ziel I.a erreicht werden und die nachhaltige Mobilität gefördert werden. Die zentrale Fragestellung an das KVM-AG lautet daher: Welches Potenzial hat ein flächendeckender Ausbau für die Mobilität im Kanton? Insbesondere soll untersucht werden, inwiefern Verkehrsverlagerungen stattfinden und, im Sinne der Priorisierung der Mittel, welche Relationen besonders profitieren mit Blick auf die in Ziel I.a definierten Räumen Kernstädte, ländliche Zentren sowie Urbane Entwicklungsgebiete (vgl. AVK, 2016).

5.3.2 Einbau der Radwege

Der Einbau der Radwege erfolgt ohne eine Erweiterung des vorhandenen Strassennetzes. Im Originalmodell sind die kantonalen Velorouten bereits als Streckenattribut vorhanden (*VELO NUMMER*). Sie liegen folglich nur innerhalb des Kantons vor, was für das angedachte Szenario ausreichend ist (Abb. 48).

Abbildung 48: Ausschnitt des vorhandenen Veloroutennetzes im KVM-AG

**Datengrundlage:**

Veloroutennetz aus dem KVM-AG Version 2022 (BVU AVK, 2024)

Karte wurde mit QGIS Version 3.42 erstellt

Originalmodell

Im KVM-AG wird der Radweg über die Geschwindigkeit sowie die MIV-Belastung abgebildet. Für das Fallbeispiel erhalten Strecken mit einer Veloroutennummer dieselben Eigenschaften wie für Radwege. Jedoch wird die betreffende Strecke nicht, wie beim Typ Radweg, für den MIV gesperrt sondern wird als baulich vom restlichen Verkehr getrennt angenommen. Im Modell wird folglich für diese Strecken die MIV-Belastung nicht berücksichtigt, dafür aber die Geschwindigkeiten für die Verkehrsmittel Velo und E-Bike erhöht. Die Umsetzung erfolgt direkt über die Formelattribute *VELO GESCHWINDIGKEIT* (Abb. 49) sowie *VELO WIDERSTAND* (Abb. 50).

Abbildung 49: Anpassung Formelattribut Velo-Geschwindigkeit

```

Formel für Attribut 'LINK;VELO_GESCHWINDIGKEIT' bearbeiten
IF([VØIV] > 0,
  MIN(12 + IF((( [VELO_CODE] = 1) + ([VELO_NUMMER] > 0)) > 0, 4,
  ([VELO_CODE] = 2) * 2), [VØIV]),
  12 + IF((( [VELO_CODE] = 1) + ([VELO_NUMMER] > 0)) > 0, 4, ([VELO_CODE] =
2) * 2)
)

```

Datengrundlage:

Eigene Anpassung basierend auf dem Ursprungsmodell KVM-AG (BVU AVK, 2024)

Abbildung 50: Anpassung Formelattribut Velo-Widerstand

```

Formel für Attribut 'LINK;VELO_WIDERSTAND' bearbeiten
|[VELO_TØ]
*
([NETZ\VELO_WIDERSTAND_STEIGUNG_MIN] + ([NETZ\VELO_WIDERSTAND_STEIGUNG_MAX]
- [NETZ\VELO_WIDERSTAND_STEIGUNG_MIN])
* 1 / (1 + exp(-[NETZ\VELO_WIDERSTAND_STEIGUNG_A] * ([STEIGUNG] - [NETZ
\VELO_WIDERSTAND_STEIGUNG_B])))
*
IF(
  (([VELO_CODE] = 1) + ([VELO_NUMMER] > 0)) > 0,
  1.0,
  [NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN] +
  (
    [NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MAX] - [NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-
BELASTUNG_MIN]
  ) * 1 / (
    1 + EXP(
      -[NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_A] * (
        [BEL_MIV] - [NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_B]
      )
    )
  )
)
)
*
IF([VELO_CODE] = 1, 1.0, 1.0)

```

Datengrundlage:

Eigene Anpassung basierend auf dem Ursprungsmodell KVM-AG (BVU AVK, 2024)

Erweitertes Modell

Der Einbau erfolgt im erweiterten Modell nach dem selben Prinzip. Über die Erweiterung der Identifikation der Velorouten werden die Eigenschaften des Radwegs auch auf Strecken mit Velorouten angewandt. Durch die Konsolidierung der Eigenschaften im Streckenwahrnehmungsfaktor erfolgt der Einbau direkt über jene Formel (Abb. 51). Die Geschwindigkeit muss im erweiterten Modell nicht angepasst werden, da durch die Konsolidierung der Formeln im Streckenwahrnehmungsfaktor jene darin bereits berücksichtigt wird.

Abbildung 51: Anpassung Formelattribut Velo-Widerstand

```

Formel für Attribut 'LINK;VELO_WIDERSTAND_MIV' bearbeiten
IF([VELO_CODE] = 1, 0.89,
IF([VELO_NUMMER] > 0, 0.89,
IF([VØIV]=0, 1.0,
IF([VØIV]=[VELO_GESCHWINDIGKEIT], 1.0,
IF([VØIV]>[VELO_GESCHWINDIGKEIT],

([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN] + ([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-
BELASTUNG_MAX] - [NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN])
* 1 / (1 + exp(-[NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_A] * ([BEL_MIV] -
([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_B]/(
IF([VØIV]-([VELO_GESCHWINDIGKEIT]+2)=0, 1.0,
[VØIV]
-([VELO_GESCHWINDIGKEIT]+IF([VELO_CODE] = 2, [VELO_CODE], 0)))
)))))),

IF([VØIV]<[VELO_GESCHWINDIGKEIT],

([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN] + ([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-
BELASTUNG_MAX] - [NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_MIN])
* 1 / (1 + exp(-[NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_A] * ([BEL_MIV] -
([NETZ\VELO_WIDERSTAND_MIV-BELASTUNG_B]/(
IF([VØIV]-([VELO_GESCHWINDIGKEIT]+2)=0, 1.0,
([VELO_GESCHWINDIGKEIT]+IF([VELO_CODE] = 2, [VELO_CODE], 0))-[VØIV])
)))))),
1.0))))))

```

Datengrundlage:

Eigene Anpassung basierend auf dem Ursprungsmodell KVM-AG (BVU AVK, 2024)

5.3.3 Auswertung Analyse- und Prognosemodell

Um die Auswirkungen einer Ausweitung der Radwege differenziert betrachten zu können, wird der Ausbau einmal im Analysemodell und einmal im Prognosemodell implementiert. Diese Unterscheidung dient zugleich dazu, die Funktionsweise der beiden Modelleinstellungen aufzuzeigen und aufzudecken, ob sich das Analysemodell allenfalls eignet für die Bearbeitung der Fallbeispiele.

Im kantonalen Strassennetz des KVM-AG sind bereits 27,9 % der Velorouten als Radwege ausgewiesen. Durch den Einbau des Fallbeispiels A steigt folglich die Quote auf 100 % an. Dies erhöht den Anteil an Radwegen am gesamten Strassennetz innerhalb des Kantons von 3,6 % auf 12,7 %.

Die Auswertung des globalen Modalsplits, also des gesamten Modells, zeigt die zu erwartende Stabilität. Sowohl im Analysemodell als auch im Prognosemodell sind die globalen Modalsplits im Verhältnis zum Referenzmodell unverändert. Die Veränderungen sind zu gering, als dass dies im globalen Modalsplit eine Auswirkung hätte.

Tabelle 8: Globaler Modalsplit im KVM-AG für Fallbeispiel A: Velorouten sind Radwege

Zustand	Modalsplit [%]					Differenz zu Referenzzustand [%P]				
	Fuss	MIV	ÖV	Velo	E-Bike	Fuss	MIV	ÖV	Velo	E-Bike
Referenz	26,29	9,58	45,53	17,11	1,48					
Analyse	26,29	9,58	45,53	17,11	1,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Prognose	26,29	9,58	45,53	17,11	1,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Modalsplit nach Verkehrsleistung

Es gilt jedoch zu unterscheiden zwischen dem globalen und dem kantonalen Modalsplit. Da nur der globale Modalsplit fixiert ist, kann es zu Verschiebungen in einzelnen Bezirken kommen, solange diese sich global ausgleichen. Dieser Effekt ist zu beobachten, wenn man rein den kantonalen Modalsplit betrachtet. Darin ist bereits eine deutliche Verschiebung im Analysemodell zu erkennen (Tab. 9). Da im Szenario nur die kantonalen Velorouten zu Radwegen ausgebaut werden, war eine Verschiebung des Modalsplits erst auf kantonaler Ebene zu erwarten.

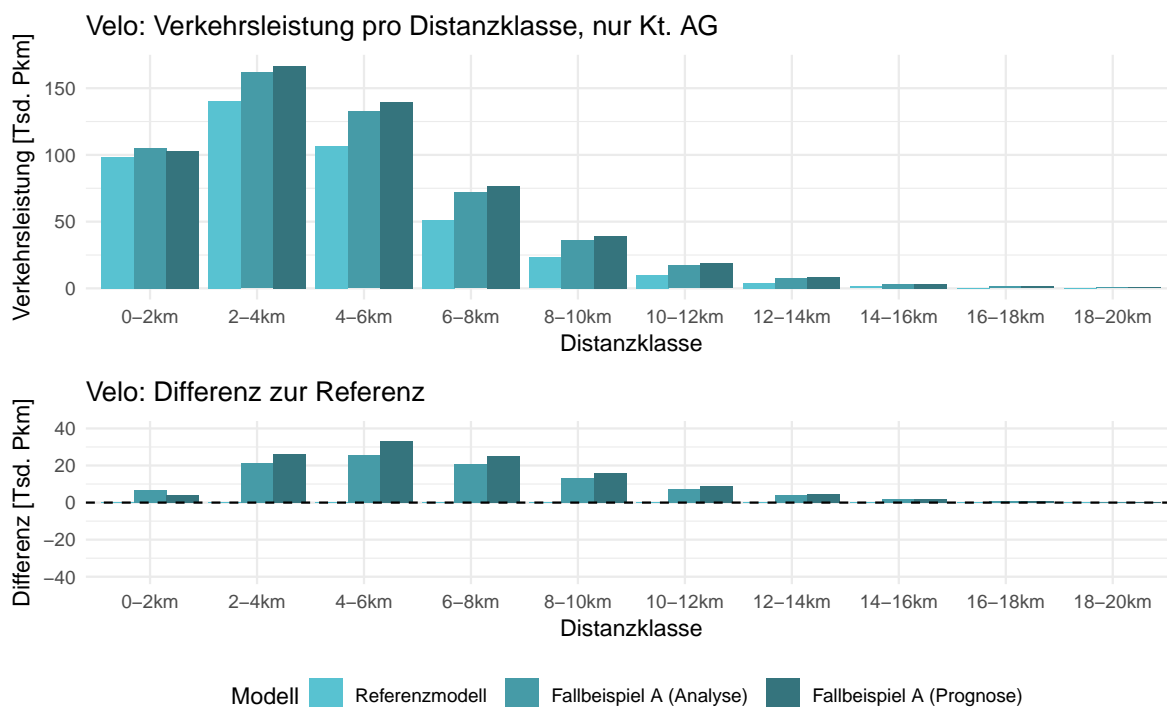
Tabelle 9: Kantonaler Modalsplit im KVM-AG für Fallbeispiel A: Velorouten sind Radwege

Zustand	Modalsplit [%]					Differenz zu Referenzzustand [%P]				
	Fuss	Velo	MIV	ÖV	E-Bike	Fuss	Velo	MIV	ÖV	E-Bike
Referenz	19,05	7,89	60,41	11,12	1,53					
Analyse	18,70	8,93	59,78	10,93	1,66	-0,35	+1,04	-0,64	-0,19	+0,13
Prognose	18,69	8,96	59,75	10,92	1,67	-0,36	+1,07	-0,66	-0,20	+0,14

Modalsplit nach Verkehrsleistung

Wertet man die Verkehrsleistung innerhalb des Kantons aus, so wird ersichtlich, dass im Analysemodell bereits ein grosser Teil der zusätzlichen Verkehrsleistung zustande kommt. Die Differenz von Analyse zu Prognosemodell ist gering.

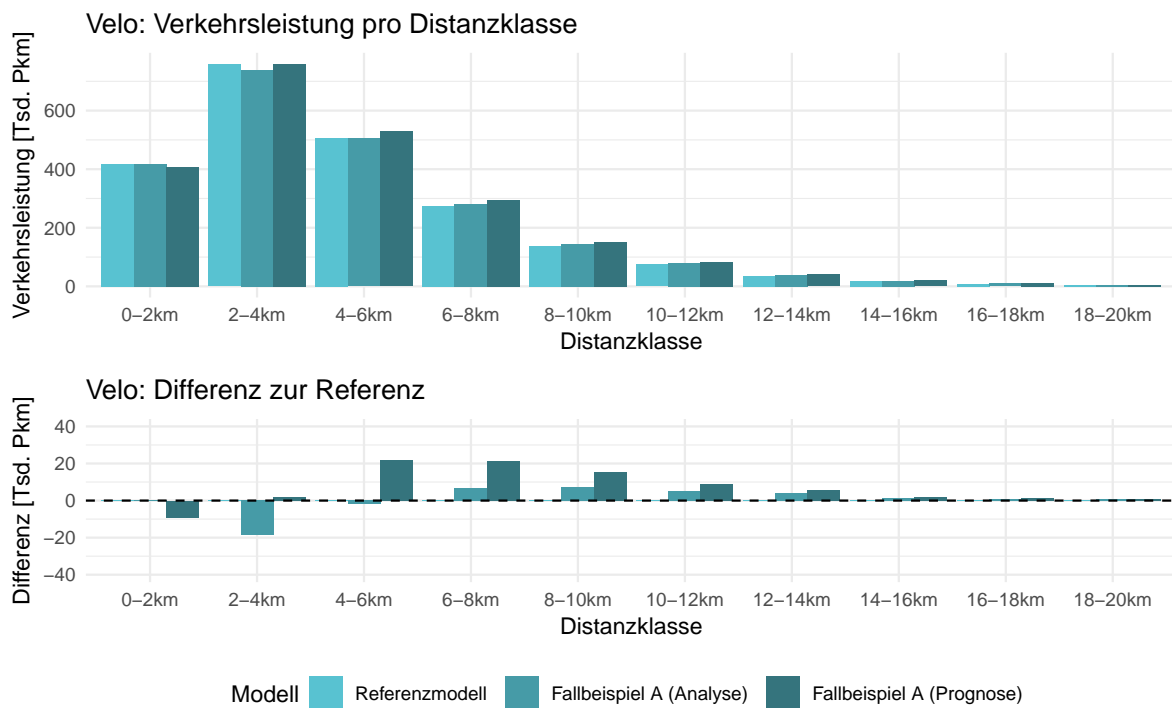
Abbildung 52: Kumulative Verkehrsleistung Modus Velo innerhalb Kt. AG



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Betrachtet man die Verkehrsleistungen im gesamten Modell, wird ersichtlich, dass eine Auswertung der Fallbeispiele nur im Prognosemodell stattfinden kann. Das Modell wertet die Verbesserung der Radverkehrsanlagen im Kanton im Verhältnis zu allen anderen. Somit werden Radnetze, beispielsweise in Basel oder Zürich unattraktiver im Verhältnis zum Kanton Aargau. Somit kompensiert das Analysemodell die Zunahme im Kanton mit einer Abnahme ausserhalb des Kantons. Ausserkantonale Strecken bleiben von der Massnahme unberührt, verschlechtern sich folglich im Verhältnis zu den kantonalen Strecken. Dies wird ersichtlich an der Abnahme von kurzen Strecken im Analysemodell auf globaler Ebene (Abb. 53), während diese innerhalb des Kantons zunehmen (Abb. 52). Die Ergebnisse sind daher nur im Prognosemodell zu bewerten, da eine Verschlechterung der ausserkantonalen Radnetze aufgrund einer Verbesserung im Aargau als unplausibel erscheint.

Abbildung 53: Verkehrsleistung Velo nach Distanzklassen gesamtes KVM-AG



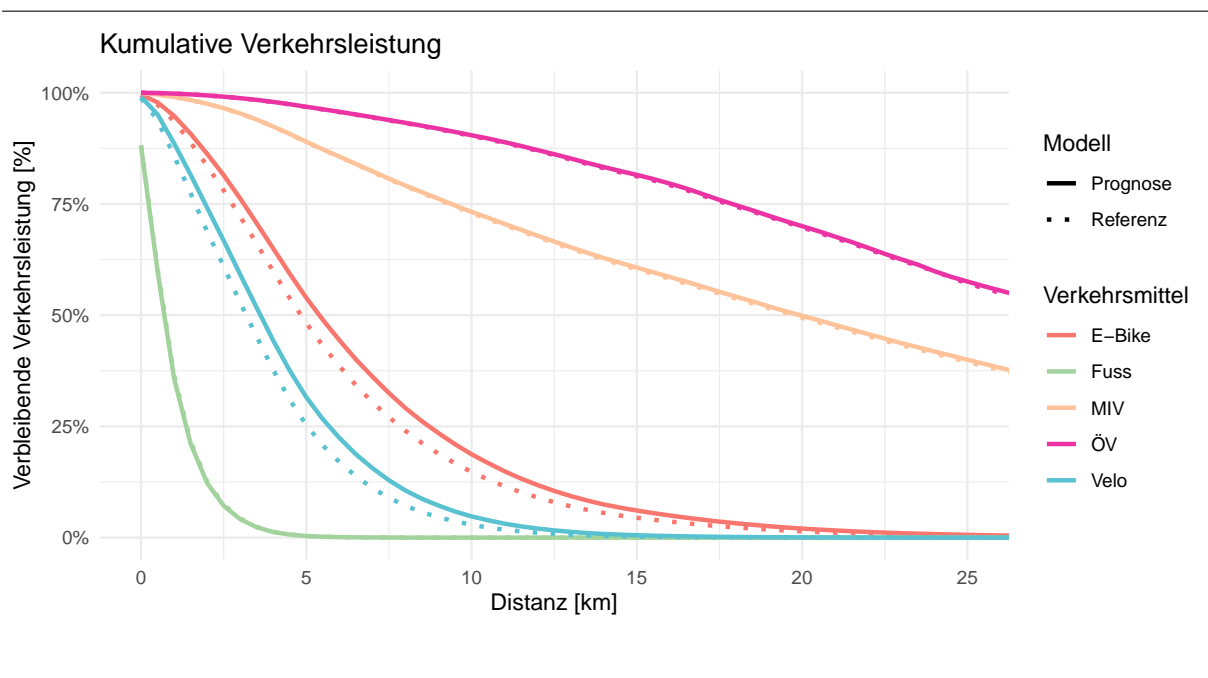
Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Da das Analysemodell die Vorgaben zum Modalsplit starr einhält, ist dieses nicht geeignet für eine differenzierte Auswertung um reine Umlegungsergebnisse von Ergebnissen des Modalsplits zu erhalten. Folglich kann keine Aussage darüber getroffen werden, welche Effekte aus der Umlegung stammen und welche von Faktoren wie der Zielwahl stammen.

5.3.4 Auswertung Distanzen und Verkehrsleistung

Da sich die Auswertung im Analysemodell nicht bewährt hat, wird nachfolgend jeweils nur im Prognosemodell gearbeitet. Durch die Auswertung der kumulativen Distanzverteilung ist deutlich zu erkennen, dass die Radwege dazu führen, dass die betroffenen Verkehrsmittel Velo und E-Bike in der Distanzverteilung zunehmen. Aufgrund der hohen Verkehrsleistung des MIV und ÖV sind die im Modalsplit beobachteten Abnahmen (Tab. 9) in der relativen Verteilung nicht zu erkennen.

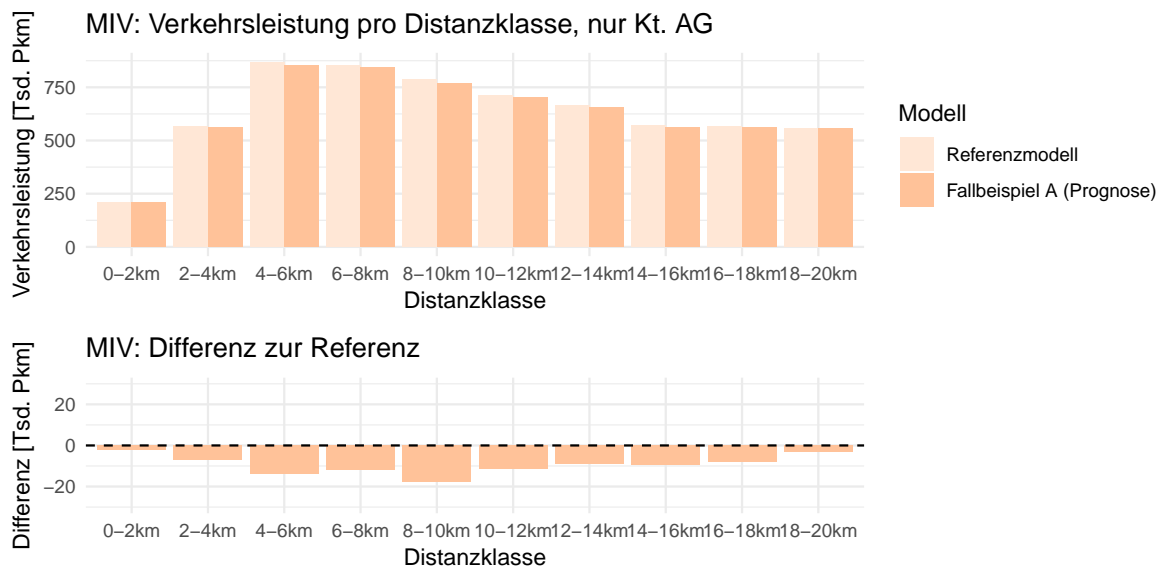
Abbildung 54: Kumulative Verkehrsleistung aller Modi innerhalb Kt. AG nach Distanz



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Die Unterschiede beim MIV wird erst in der Darstellung der absoluten Verkehrsleistung ersichtlich, welche deutlich grösser ist beim MIV und ÖV rein aufgrund der viel höheren Distanzen die zurückgelegt werden. Hierbei ist zu erkennen, dass über die Hälfte der gewonnenen Verkehrsleistung beim Velo und E-Bike vom MIV zu stammen scheint (Abb. 55). Dies ist bereits im kantonalen Modalsplit zu erkennen (Tab. 9). Insbesondere die mittleren Distanzen von 4 bis 16 km verlieren an Anteile an den Radverkehr.

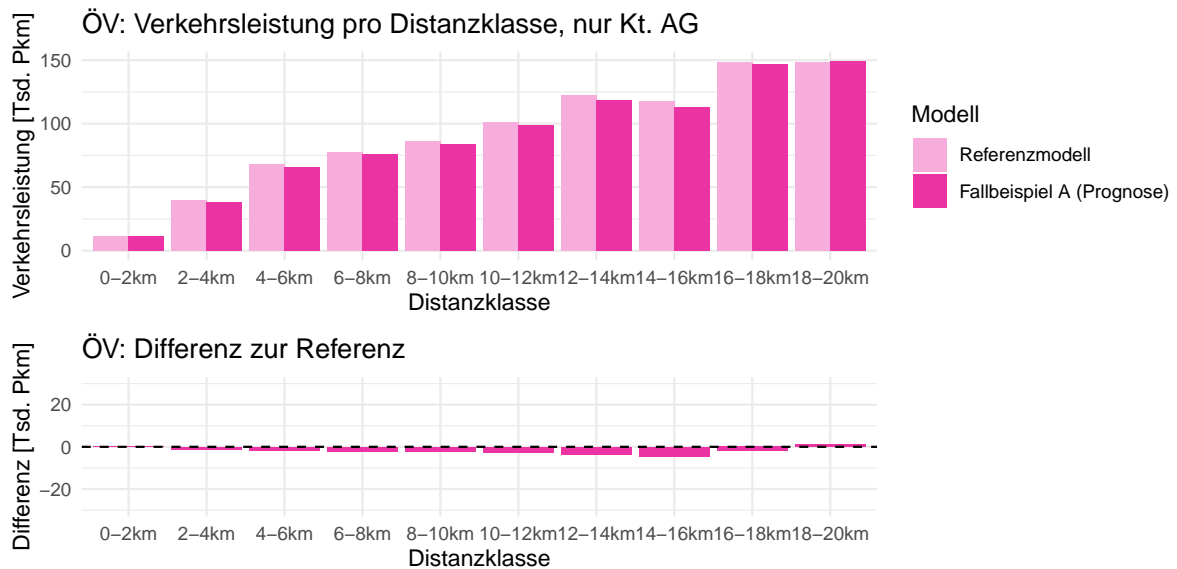
Abbildung 55: Verkehrsleistung MIV nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Der ÖV hingegen verliert weniger Verkehrsleistung als der MIV. Bei einer Distanz von 12 bis 16 km scheint hier der grösste Verlust zu existieren.

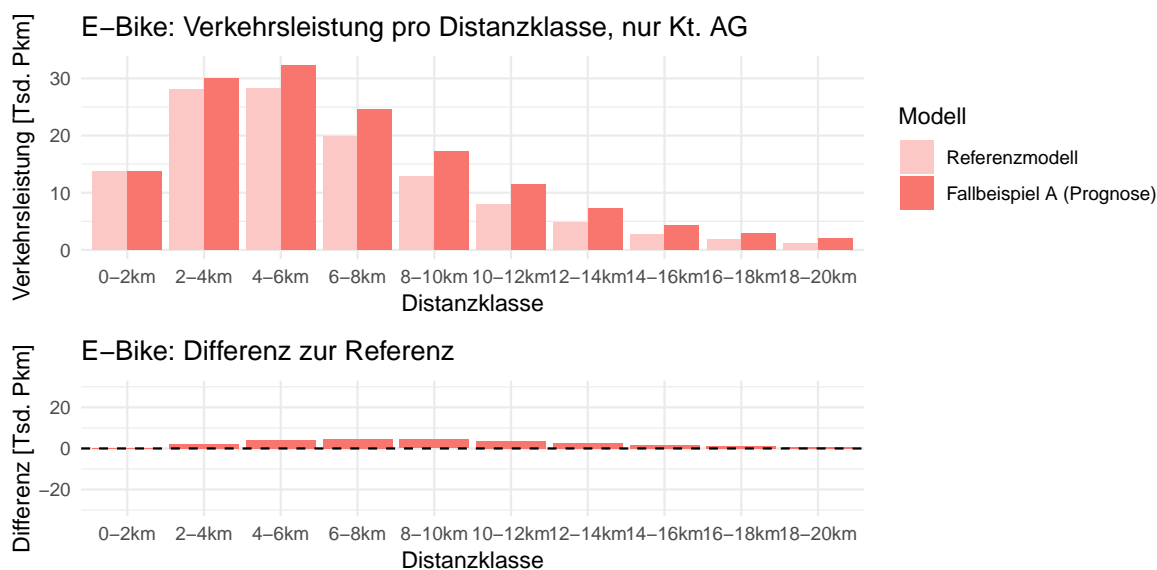
Abbildung 56: Verkehrsleistung ÖV nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Betrachtet man weiterhin die Verkehrsleistung mit Fokus auf den Radverkehr, so wird ersichtlich dass beide Modi im Vergleich zum Referenzmodell zulegen können (Velo Abb. 52 und E-Bike Abb. 57). Nur die kürzeste Streckenkategorie (0-2 km) profitiert nicht von den Radwegen. Dies wohl da die meisten Zonen nicht direkt an eine Veloroute und folglich Radweg anschliessen. Das E-Bike verhält sich wie das Velo, auch wenn die absolute Zunahme an Verkehrsleistung aufgrund der geringeren Anteils am Gesamtverkehr weniger stark ausfällt.

Abbildung 57: Verkehrsleistung E-Bike nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG

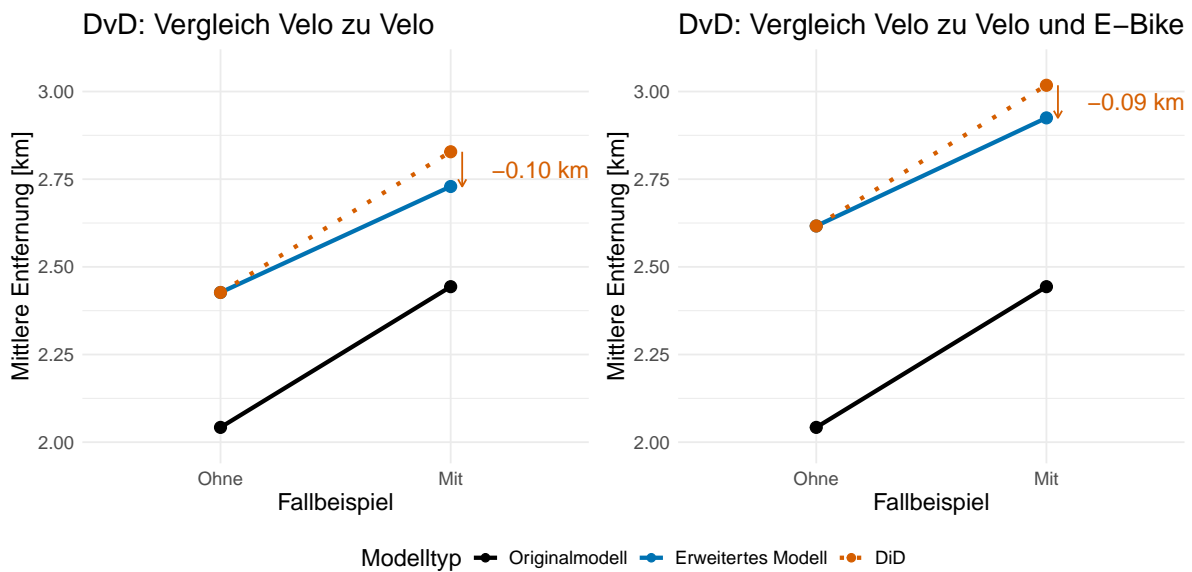


Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

5.3.5 Vergleich zu Originalmodell (DvD)

Die DvD-Analyse ergibt, dass im neuen Modell der Einfluss des Radverkehrs sowohl im kantonalen Modalsplit, wie auch nach Raumtypenrelationen unterteilt, einen weniger starke Zunahme des Radverkehrs auslöst. Dies drückt sich unter anderem in der tieferen Zunahme der mittleren Reisedistanz aus.

Abbildung 58: DvD-Analyse der mittleren Wegdistanzen Fallbeispiel A

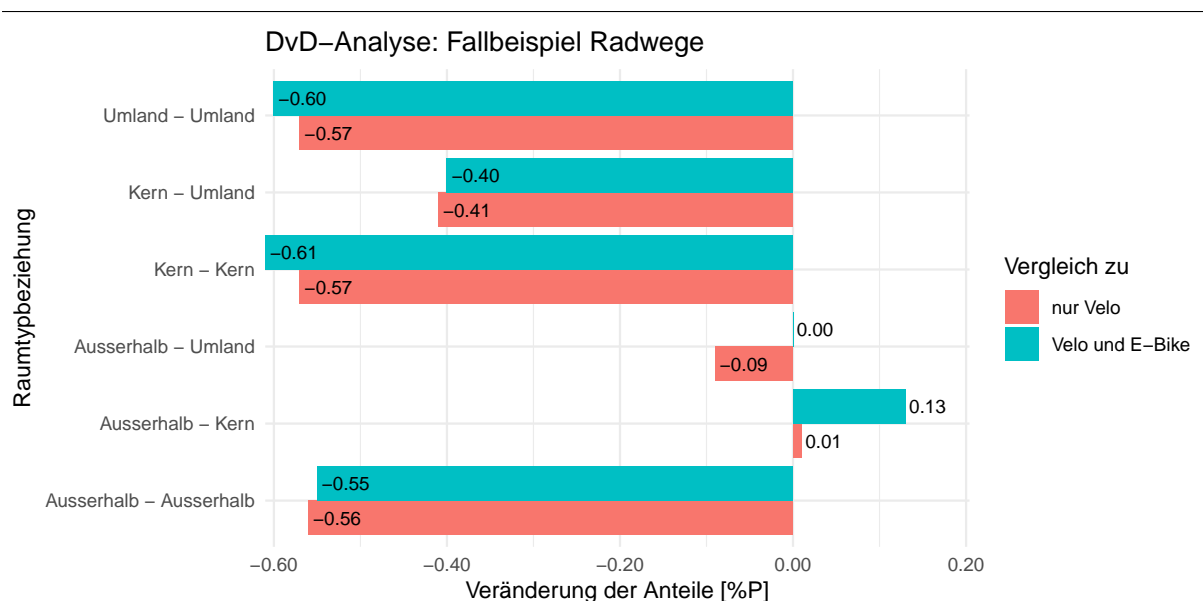


Datengrundlage:

Eigene Auswertung basierend auf dem Ursprungsmodell KVM-AG (BVU AVK, 2024) und dem erweiterten Modell KVM-AG, nur Kanton Aargau

Für den «Differenz von Differenzen»-Ansatz scheint die Art des Einbaus des Radweges mit in das System zu fließen. Während das Originalmodell einen Geschwindigkeitszuschlag von 4 km/h für den Veloverkehr vorsieht, wird im erweiterten Modell lediglich ein Zuschlag von 2 km/h gewährt. Hinzu kommt der Einfluss der Geschwindigkeit, welche stark belastete Strassen mit niedriger Höchstgeschwindigkeit in ihrem Einfluss abschwächt. Dies hat zur Folge, dass fast alle Raumtypenbeziehungen, mit Ausnahme Ausserhalb - Kern, die Zunahme am Modalsplit weniger stark ausfällt als im Originalmodell. Zugleich ist der DvD in absoluten Werten gemessen mit 0,61 Prozentpunkte im Maximum an Differenz überschaubar.

Abbildung 59: DvD-Analyse bezüglich der Veränderung des Veloanteils nach Raumtypenbeziehung



Datengrundlage:

Eigene Auswertung basierend auf dem Ursprungsmodell KVM-AG (BVU AVK, 2024) und dem erweiterten Modell KVM-AG, nur Kanton Aargau. Negative Werte bedeuten eine schwächere Wirkung auf die Radanteile mit dem erweiterten Modell

Hervorzuheben ist der Unterschied des Vergleichs von Velo und Velo sowie von Velo zu Velo und E-Bike. Dort wird ersichtlich, dass das E-Bike auf eher längeren Relationen wie «Ausserhalb» nach «Kern» den Abstand zum Originalmodell zu verringern vermag.

5.3.6 Zwischenfazit

Durch die Analyse zwischen den Modellzuständen gilt es anzumerken, dass im Modell der Ausbau der Radwege nur innerhalb des Kantons geschieht. Dies bedeutet, dass die Modalsplit-Verschiebung teilweise auch darauf beruht, dass ausserhalb des Kantons keine Verbesserung der Radinfrastruktur erfolgt.

Die DvD-Analyse erweist sich im vorliegenden Fall nur teilweise als geeignet. Zu sehr scheinen sich im neuen Modell die Wirkung des Radwegs verändert zu haben. Kritisch erscheint hier insbesondere die Wirkungsgrösse zu sein. Da sich die Faktoren auf die Reisezeit auswirken, würde eine einheitliche, empirisch bestätigte Wirkungsgrösse helfen, um die genaue Wirkung beurteilen zu können. Da diese fehlt kann nur festgestellt werden, dass der Radweg im Referenzmodell anders berücksichtigt wird als im Ursprungsmodell.

Interessanter erscheint daher die Auswertung der Distanzklassen im erweiterten Modell zu sein. Durch die Differenzierung der Radtypen kann der Unterschied der Distanzklassen aufgezeigt werden. Die Förderung der Radwege geht indes insbesondere auf Kosten der MIV-Verkehrsleistung. Ob diese Implikation der Realität entspricht, kann jedoch nicht abschliessend beurteilt werden. Hierfür müsste der Einfluss des Radweges besser bekannt sein, da deren Grösse direkt die Verlagerung auslöst. Basierend auf den kalibrierten Distanzzerfallsfunktionen erscheint die Verlagerung jedenfalls intuitiv zu sein.

5.4 Fallbeispiel B: Erhöhung der E-Bike-Nutzungs-/Besitzquote

5.4.1 Szenario

In diesem Fallbeispiel soll untersucht werden, welche Auswirkungen eine Erhöhung der E-Bike-Anteils im Kanton Aargau hätte. Das hypothetische Szenario ist, dass der Kanton das Verlagerungspotenzial auf mittleren Distanzen ausschöpfen möchte, um das Zielbild des Gesamtverkehrs für das Jahr 2040 (AVK, 2016) zu erreichen. Hierzu soll geprüft werden, welche Folgen eine Erhöhung der E-Bike-Nutzung hat. Unabhängig der konkreten politischen Massnahme wird davon ausgegangen, dass die Massnahme eine flächendeckende Verdoppelung der aktuellen E-Bike-Nutzungsquoten auslöst. Mithilfe des KVM-AG soll nun ermittelt werden, welchen Einfluss die Förderung des E-Bikes auf den Modalsplit hat, sowie welche Modi und Relationen davon profitieren können. Ziel ist festzustellen, wo die Mittel zur Förderung am besten allokiert werden sollen.

5.4.2 Einbau

Erweitertes Modell

Im erweiterten Modell sind die Nutzungsquoten für E-Bikes und Velos bereits vorhanden. Um das Szenario, welches genau auf diese Erweiterung abzielt, umzusetzen, wird lediglich die Formel um den gewünschten Faktor erhöht.

Abbildung 60: Anpassung Nutzungsquotenformel im erweiterten Modell

```
Formel für Attribut 'ZONE;ZON_EBIKE' bearbeiten
IF([B_FUNKTIONALERÄUME] > 0, (
  [OEV_A] * ( 0.011885 / 0.06425447) * 0.96 * 2 +
  [OEV_B] * ( 0.012286 / 0.07496034) * 0.92 * 2 +
  [OEV_C] * ( 0.016797 / 0.10773573) * 1.00 * 2 +
  [OEV_D] * ( 0.021922 / 0.12069162) * 1.40 * 2 +
  [OEV_KEINE] * ( 0.016240 / 0.13897331) * 1.19 * 2 )
* 3.3 + 0.028, 1)
```

Originalmodell

Da das Originalmodell kein E-Bike und keine Nutzungsquoten enthält, wird für die Bearbeitung jener Fragestellung eine künstliche Nutzungsquote eingebaut. Die grundsätzliche Überlegung hinter dem Einbau ist, wie eine solche Fragestellung ohne differenzierten Radverkehr bearbeitet werden kann. Die Nutzungsquote des E-Bikes sowie deren Anteil am Radverkehr kann auch ohne das erweiterte Modell ermittelt werden. Um eine spätere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wird derselbe zusätzliche Nutzen aus der Verdoppelung der Nutzungsquote aus dem erweiterten Modell verwendet. Es wird folglich nicht die verdoppelte Nutzungsquote direkt verwendet, sondern lediglich die Differenz des Affinitätsfaktors, die sich aus der Erhöhung ergibt (Formel 16).

$$\Delta \text{Affinität} = \text{Affinitätsfaktor}_{\text{neu}} - \text{Affinitätsfaktor}_{\text{alt}} \quad (16)$$

Durch die Verdopplung der ursprünglichen Nutzungsquote, kann der E-Bike-Nutzungsquotenfaktor als Differenz direkt aus der Nutzungsquote berechnet werden (Formel 17).

$$\Delta f_{NQ} = (2 \cdot N_{E-Bike,z}) \cdot a + b - (N_{E-Bike,z} \cdot a + b) = N_{E-Bike,z} \cdot a \quad (17)$$

wobei

- Δf_{NQ} : Differenz des Nutzungsquotenfaktors
- N_{E-Bike} : Nutzungsquote des Modus E-Bike in Zone z
- P_{E-Bike} : E-Bike-Anteil am Radverkehr (allgemein)
- a : Steigungsparameter für die Transformation
- b : Konstante für die Transformation

Das E-Bike wird hier als Teil des Veloverkehrs angesehen. Somit wird die Erhöhung der Nutzungsquote indirekt über den relativen E-Bike-Anteil P_{E-Bike} abgeschwächt, um den Einfluss nicht zu überschätzen (Formel 18). Der E-Bike-Anteil stammt aus dem ursprünglichen Einbau des E-Bikes in das Modell. Grundannahme hinter diesem Vorgehen ist, dass der Radverkehr im Originalmodell den gesamten Radverkehr abbildet. Somit wird das E-Bike als Anteil des existierenden Veloverkehrs angesehen. Auf eine komplexere Erweiterung im Originalmodell, welche beispielsweise die Geschwindigkeit betrifft, wird verzichtet. Eine solche Veränderung würde ein zusätzlicher Schritt in Richtung des erweiterten Modells darstellen.

$$f_{NQ,Originalmodell} = \Delta f_{NQ} \cdot P_{E-Bike} + 1 \quad (18)$$

5.4.3 Auswertung

Die Auswertung der Veränderung des Modalsplits auf kantonaler Ebene zeigt auf, dass das E-Bike besonders mit dem MIV konkurrenziert. Dieser verliert absolut am meisten Anteile am Gesamtverkehr. Achtet man auf den Faktor der Veränderung im erweiterten Modell wird ersichtlich, dass das E-Bike die Zunahme gleichmässig von den anderen Modi erhält. Lediglich der ÖV scheint geringer abzunehmen als die anderen Modi (Tab. 10).

Im Originalmodell verhält sich der Modalsplit in der Veränderung ähnlich. Der MIV verliert in absoluten Zahlen am meisten Anteile. Zugleich gilt einzuordnen, dass der MIV der grösste Anteil am Modalsplit besitzt, wodurch dieser anteilig viel mehr verlieren kann. Betrachtet man den Faktor der Veränderung fällt auf, dass der Unterschied beim MIV kaum auffällt, während beim Fussverkehr hingegen eine stärkere Abnahme zu verzeichnen ist.

Festzuhalten ist ebenfalls, dass im Ursprungsmodell die Abnahme grösstenteils vom Fussverkehr stammt, während das erweiterte Modell über alle Modi verteilt die Anteile erhält. Dies scheint ein Hinweis darauf zu geben, warum das E-Bike mit seinen Eigenschaften eine direktere Konkurrenz zum MIV darstellt als das Velo.

Tabelle 10: Vergleich kantonaler Modalsplit im KVM-AG für Fallbeispiel Nutzungsquote von erweitertem Modell zum Ursprungsmodell

Modus	Erweitertes Modell			Ursprungsmodell		
	Modalsplit	Diff. zu Ref.	Faktor	Modalsplit	Diff. zu Org.	Faktor
Fuss	2,218 %	-0,006 %P	0,997	2,251 %	-0,005 %P	0,998
Velo	3,310 %	-0,010 %P	0,997	2,912 %	+0,046 %P	1,016
MIV	66,175 %	-0,177 %P	0,997	66,539 %	-0,032 %P	1,000
ÖV	27,562 %	-0,024 %P	0,999	28,298 %	-0,010 %P	1,000
E-Bike	0,735 %	+0,217 %P	1,296			

Modalsplit nach Verkehrsleistung innerhalb des Kantons

Wertet man den kantonalen Modalsplit nach Raumtypenrelationen aus, wird ersichtlich dass Ausserhalb-Relationen die höchsten Zunahmen erfahren. Dennoch ist der Faktor der Zunahme mit 1,79 geringer als die Verdoppelung der Nutzungsquote (Tab. 11). Die Effektstärke scheint sich daher nicht im gleichen Verhältnis auf die Anzahl E-Bike-Fahrten zu übertragen, wenn die Nutzungsquote erhöht wird.

5.4.4 Vergleich zu Originalmodell (DvD)

Im Originalmodell führt die Einführung einer fiktiven Erhöhung der E-Bikenutzung ebenfalls zu einem moderaten Anstieg des Veloanteils. Hier werden jedoch die Limitationen einer nicht differenzierten Abbildung ersichtlich. Die Verkehrsleistung nimmt zu, jedoch kommt es zu keiner

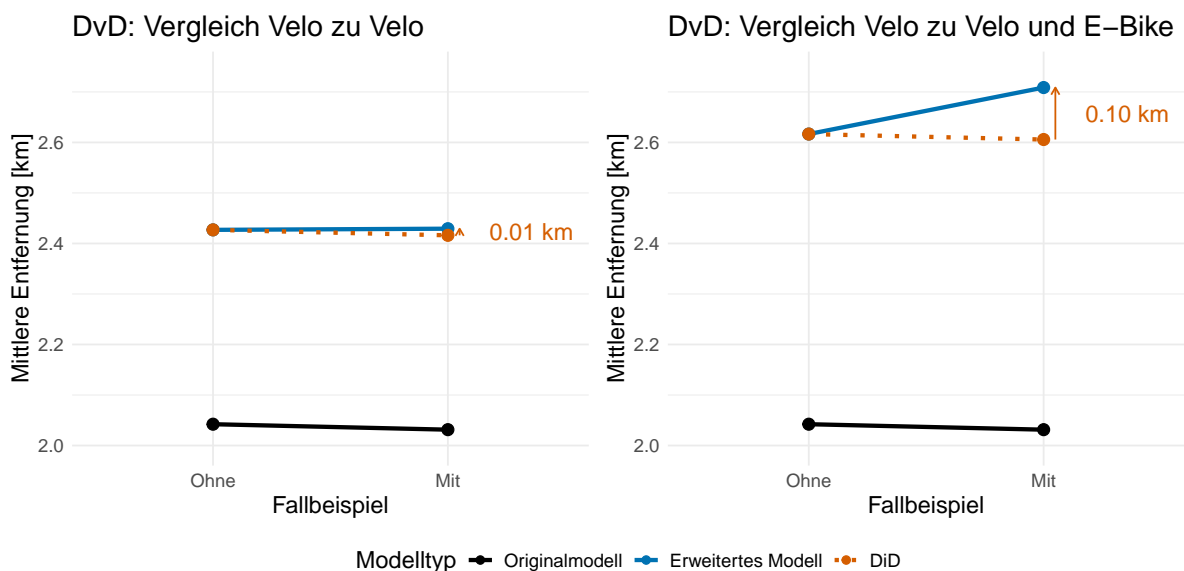
Tabelle 11: Differenz des kantonalen Modalsplits im KVM-AG von Referenzzustand zu Fallbeispiel Nutzungsquote

Raumtypenrelation	Modalsplit E-Bike		Unterschied zu Referenz	
	Referenz [%]	Fallbeispiel [%]	Absolut [%P]	Faktor [-]
Ausserhalb - Ausserhalb	1,80	2,62	+0,82	1,46
Ausserhalb - Kern	0,62	1,11	+0,49	1,79
Ausserhalb - Umland	1,10	1,72	+0,62	1,56
Kern - Kern	1,28	1,67	+0,39	1,30
Kern - Umland	1,62	2,19	+0,57	1,35
Umland - Umland	1,74	2,44	+0,70	1,40

Modalsplit nach Anzahl Wege innerhalb des Kantons

Verschiebung der Distanzverteilung des Veloverkehrs. Dieser müsste jedoch aufgrund der längeren erreichbaren Distanzen zunehmen. Da der Einbau sich auf die Erhöhung der Affinität, respektive Nutzungsquote, beschränkt, erfolgt keine Verschiebung in der Distanzverteilung. Da das E-Bike im erweiterten Modell eine eigene, höhere Distanzverteilung besitzt, führt eine Zunahme an E-Bikefahrten zu einer Zunahme der mittleren Wegdistanzen im Radverkehr.

Abbildung 61: DvD-Analyse der mittleren Wegdistanzen Fallbeispiel B



Datengrundlage:

Eigene Auswertung basierend auf dem Ursprungsmodell KVM-AG (BVU AVK, 2024) und dem erweiterten Modell KVM-AG, nur Kanton Aargau

Betrachtet man die Differenz von Differenzen von Modalsplit und Verkehrsleistung, lässt sich ein deutlicher Unterschied in der Wirkung feststellen. Das erweiterte Modell reagiert aufgrund der Verdopplung der Nutzungsquote stärker und führt insbesondere zu einer erhöhten Verkehrsleistung. Eine plausible Erklärung dafür liegt in der höheren Fahrgeschwindigkeit sowie in der Distanzzerfallfunktion, durch die ein grösseres Potential an Distanzen erreicht werden kann. Im Originalmodell ist zwar derselbe Affinitätszuwachs eingebaut, jedoch ist das Potenzial beim reinen Veloverkehr früher ausgeschöpft. Hauptgrund ist wohl die fixierte Fahrgeschwindigkeit des Velos, welche keine Adaption bei zunehmendem E-Bikeanteil vorsieht.

Tabelle 12: DvD für Fallbeispiel Nutzungsquote

Modus Fahrrad (Velo und falls vorhanden E-Bike)		
Modell	Verkehrsleistung [Tsd. Pkm]	Anteil am Verkehr
Erweitertes Modell mit Fallbeispiel	2'868	4,25%
Erweitertes Modell ohne Fallbeispiel	2'734	4,04%
Ursprungsmodell mit Fallbeispiel	2'014	2,96%
Ursprungsmodell ohne Fallbeispiel	1'984	2,91%
Differenz von Differenzen	104	0,16%P

5.4.5 Zwischenfazit

Das erweiterte Modell reagiert deutlich sensibler auf Veränderungen in der Nutzungsquote. Eine Erhöhung dieser Quote führt unmittelbar zu einer Zunahme der E-Bike-Fahrten und Verkehrsleistung. Dies ist als sehr positiver Ansatz zu werten: Eine Verdoppelung der Nutzungsquote führt unmittelbar zu einem Anstieg der E-Bike-Nutzung. Inwiefern dieser Mechanismus in der Realität erreicht werden kann, kann mit diesem Fallbeispiel nicht ergründet werden. Insbesondere die reine Erhöhung der Besitzquote an E-Bikes würde bei stagnierendem Modalsplit zu einer Abnahme der Nutzungsquote führen (vgl. Formel 13).

Für die grundlegende Frage, in welchen Bereichen und Relationen sich eine Erhöhung der Nutzungsquote besonders positiv auswirken würde, liefert der Ansatz erste Hinweise und scheint zu funktionieren. Im direkten Vergleich zum Originalmodell nimmt das erweiterte Modell die Massnahme deutlich stärker auf. Offen bleibt, ob die isolierte Übernahme der Nutzungstendenzdifferenz aus dem erweiterten Modell im Originalmodell die gewünschte Wirkung entfalten kann. Der Faktor trifft auf einen Modus mit geringerer Geschwindigkeit und einer stärkeren Distanzzerfallfunktion. Folglich ist das Potenzial für den Veloverkehr nicht gleich hoch wie für das E-Bike. Hier scheint die Limitation im Originalmodell zu liegen, da der Einbau einer so konkreten Fragestellung ans E-Bike nur mittels vieler Annahmen möglich ist. Wobei nebst der Erhöhung der Nutzungsquote auch die Durchschnittsgeschwindigkeit angepasst werden müsste. Hier liegt ein Vorteil einer radtypenspezifischen Abbildung.

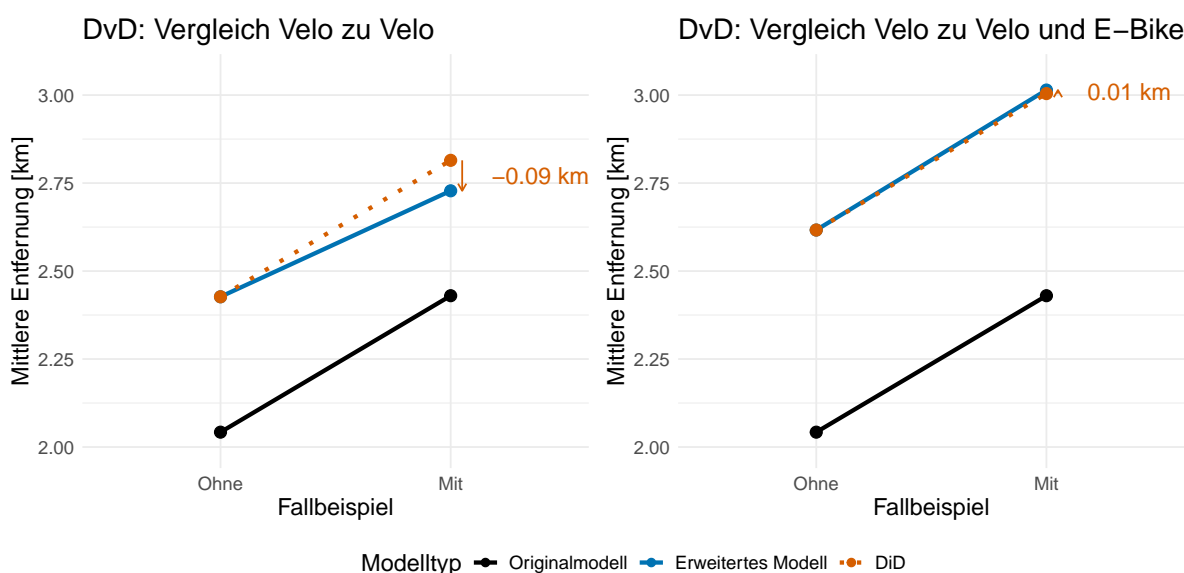
5.5 Fallbeispiel AB: Kombination der Fallbeispiele A und B

Im abschliessenden Fallbeispiel werden die beiden zuvor durchgeführten Fallbeispiele in Kombination angewandt. Dadurch soll festgestellt werden, wie sich die beiden Fallbeispiele gegenseitig beeinflussen und ob sich gegenseitig verstärkende Effekte zeigen.

5.5.1 Vergleich zu Originalmodell (DvD)

Dieselbe Kombination der Fallbeispiele wird auch im Originalmodell durchgeführt. Die Auswirkungen im Originalmodell sind geringer als im erweiterten Modell. In der mittleren Distanz des Radverkehrs wird der zuvor festgestellte Effekt der tieferen Wirkungsweise des Radwegs im erweiterten Modell durch die Zunahme des E-Bikes ausgeglichen (Abb. 62). Über den gesamten Radverkehr betrachtet nimmt die Distanzverteilung fast identisch mit dem Originalmodell zu.

Abbildung 62: DvD-Analyse der mittleren Wegdistanzen Fallbeispiel AB



Datengrundlage:

Eigene Auswertung basierend auf dem Ursprungsmodell KVM-AG (BVU AVK, 2024) und dem erweiterten Modell KVM-AG, nur Kanton Aargau

5.6 Auswertung aller Fallbeispiele

Obwohl im Fallbeispiel B nur das E-Bike eine formale Verbesserung durch die Erhöhung einer Nutzungsquote erhält, fällt in der Kombination aus Radwegen und E-Bike-Nutzungsquote die Zunahme des Veloverkehrs höher aus als zuvor. Dies ist insofern erstaunlich, da in dem Fallbeispiel B der Veloverkehr in der Verkehrsleistung gar abnahm zugunsten des E-Bikes (Abb. 66).

Dies ist ebenso nach Anzahl Wegen ersichtlich, wobei das Velo mehr Wege vornimmt, als durch die simple Addition von Fallbeispiel A und B (Tab. 13, Spalte A+B) zu erwarten war.

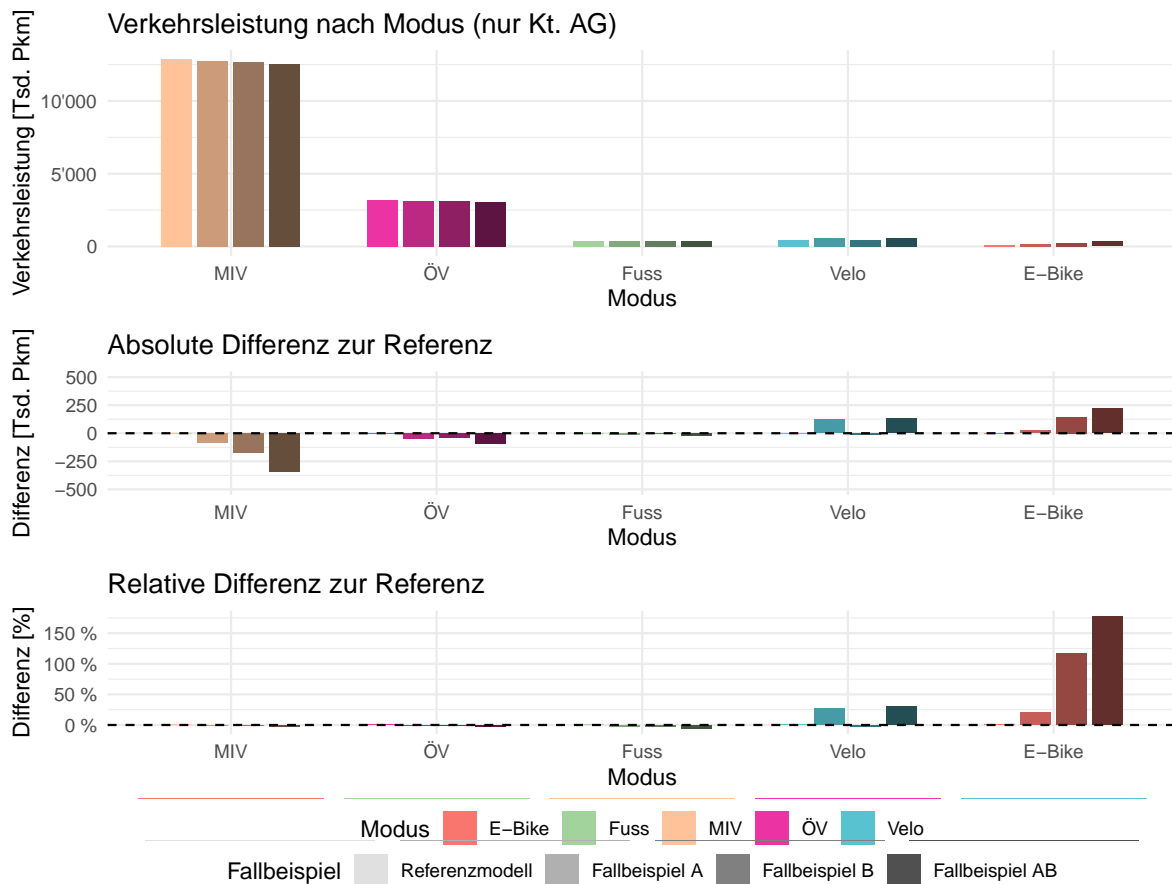
Tabelle 13: Übersicht der Veränderungen des Modalsplits je Fallbeispiel

Modus	Referenz	Differenz zu Referenz für Fallbeispiel			
	Modalsplit [%]	A [%P]	B [%P]	A+B [%P]	AB [%P]
Fuss	19,05	-0,36	-0,42	-0,77	-0,94
Velo	7,89	+1,07	-0,20	+0,87	+1,22
MIV	60,41	-0,66	-1,20	-1,86	-2,42
ÖV	11,12	-0,20	-0,14	-0,34	-0,39
E-Bike	1,53	+0,14	+1,96	+2,11	+2,53

Modalsplit nach Anzahl Wegen innerhalb des Kantons

Betrachtet man die gesamte Verkehrsleistung der Verkehrsmodi im Kanton, so wird ersichtlich, dass aufgrund des hohen MIV-Anteils die anderen Modi verhältnismässig kaum ins Gewicht fallen (Abb. 63). Der MIV scheint aufgrund der längeren Distanzverteilung in der Verkehrsleistung zu dominieren. Zugleich zeigen die Differenzen auf, dass ein Grossteil der Verkehrsleistung die beim E-Bike und Velo gewonnen wird vom MIV stammt.

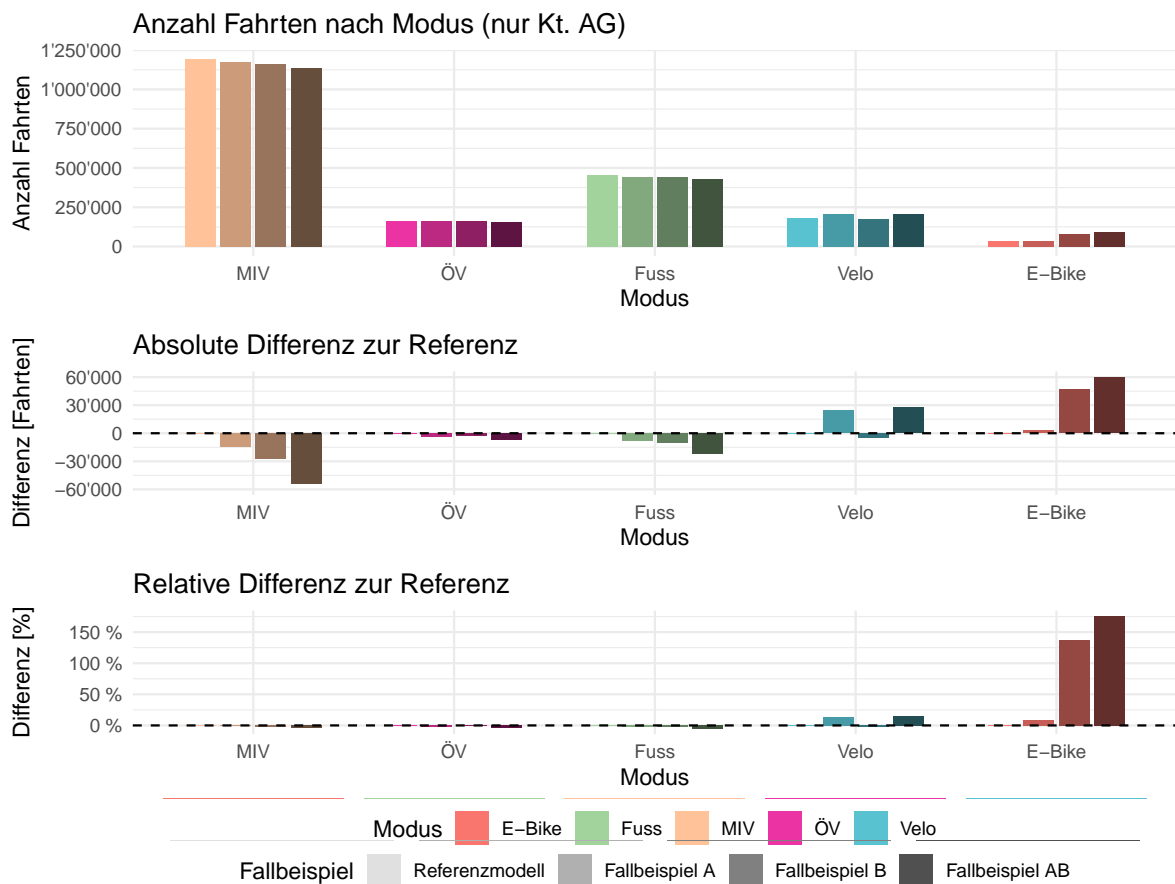
Abbildung 63: Verkehrsleistung aller Fallbeispiele und Modi innerhalb Kt. AG



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Die Betrachtung der Anzahl Wege verhilft die Stellung des LV zu verbessern im Vergleich zur Verkehrsleistung. Dieser ist, trotz der weiterhin grossen Anzahl an Wegen mit dem MIV, stärker vertreten (Abb. 64), da kurze Wege insbesondere zu Fuss und mit dem Velo bestritten werden.

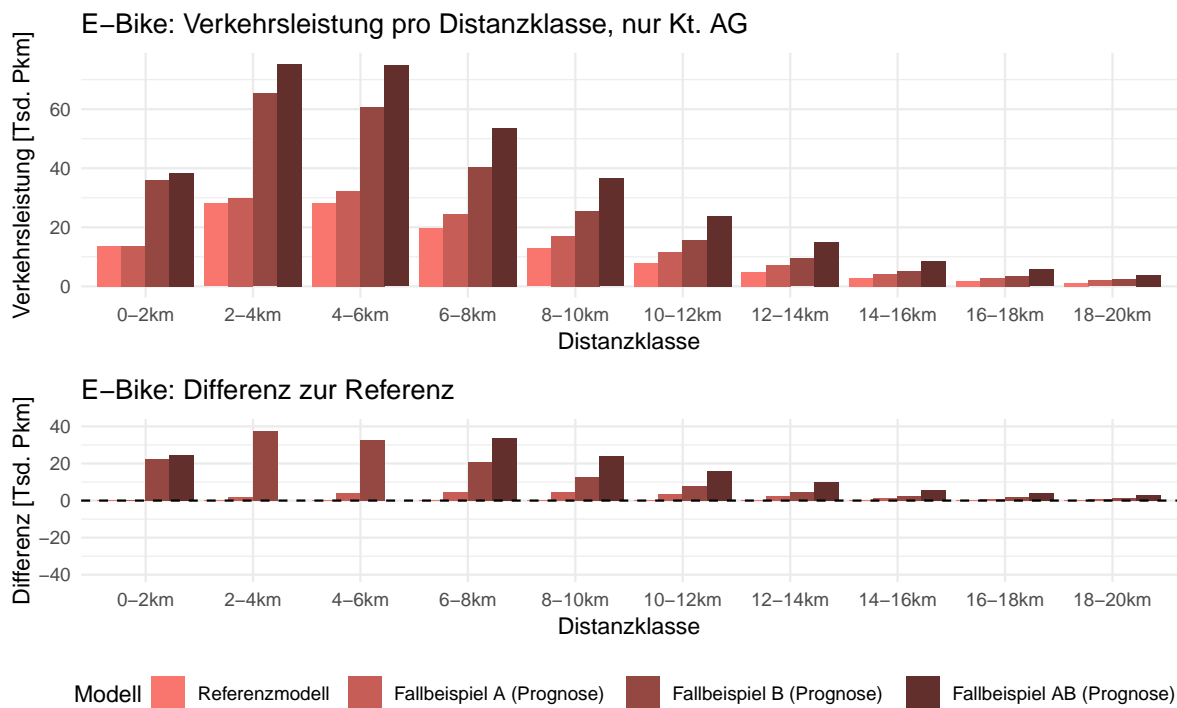
Abbildung 64: Anzahl Wege aller Fallbeispiele und Modi innerhalb Kt. AG



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Beim E-Bike ist die Erklärung plausibel, da dieser Modus sowohl von der höheren Nutzungsquote aus Fallbeispiel B als auch von den Radwegen aus Fallbeispiel A profitiert. Die Zunahme der Verkehrsleistung lässt sich hierbei durch die reine Addition sowie durch Synergien der beiden Massnahmen erklären. Einerseits durch den höheren Anreiz der Nachfrage infolge der höheren Nutzungsquote, andererseits durch den verringerten Raumwiderstand aufgrund der neuen Radwege (Abb. 65).

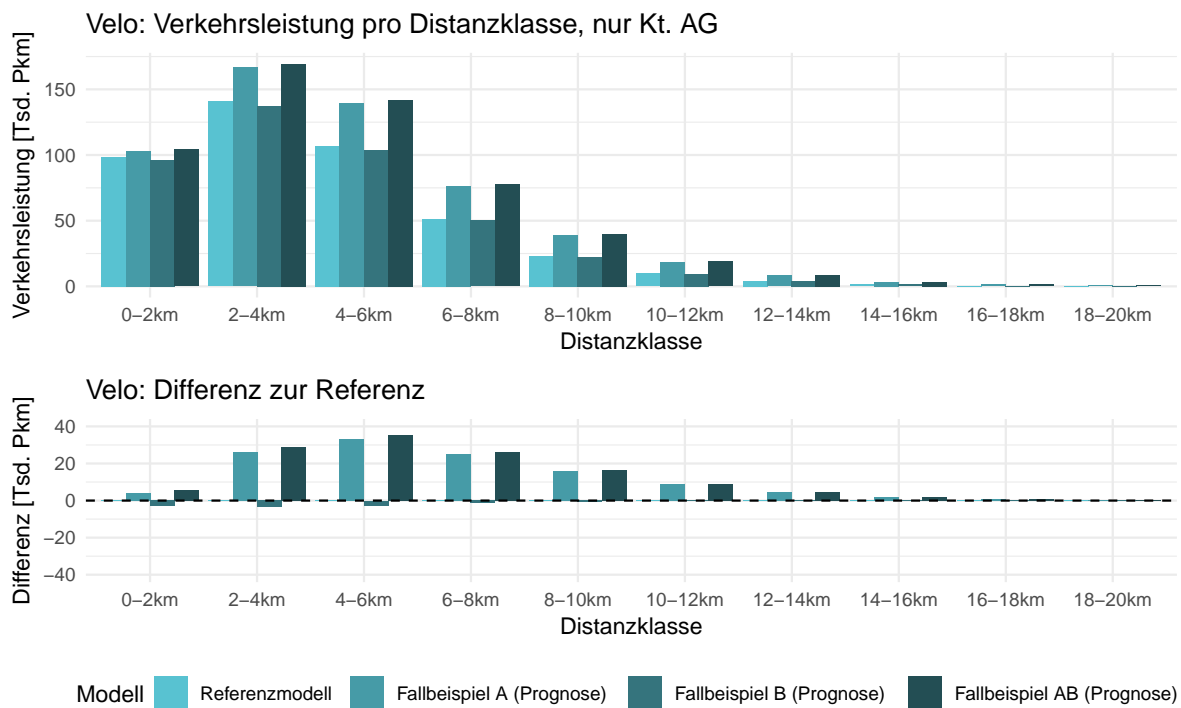
Abbildung 65: Verkehrsleistung E-Bike nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Beim Velo hingegen scheint kein direkter kausaler Zusammenhang zwischen E-Bike-Nutzungsquote und Velo zu bestehen. Im Fallbeispiel B verliert dieser gar an Verkehrsleistung. Es wird somit deutlich, dass die Kombination der beiden Fallbeispiele nicht zu einer einfachen Addition der vorherigen Fallbeispiele führt, sondern dass weitere Mechanismen wirken müssen.

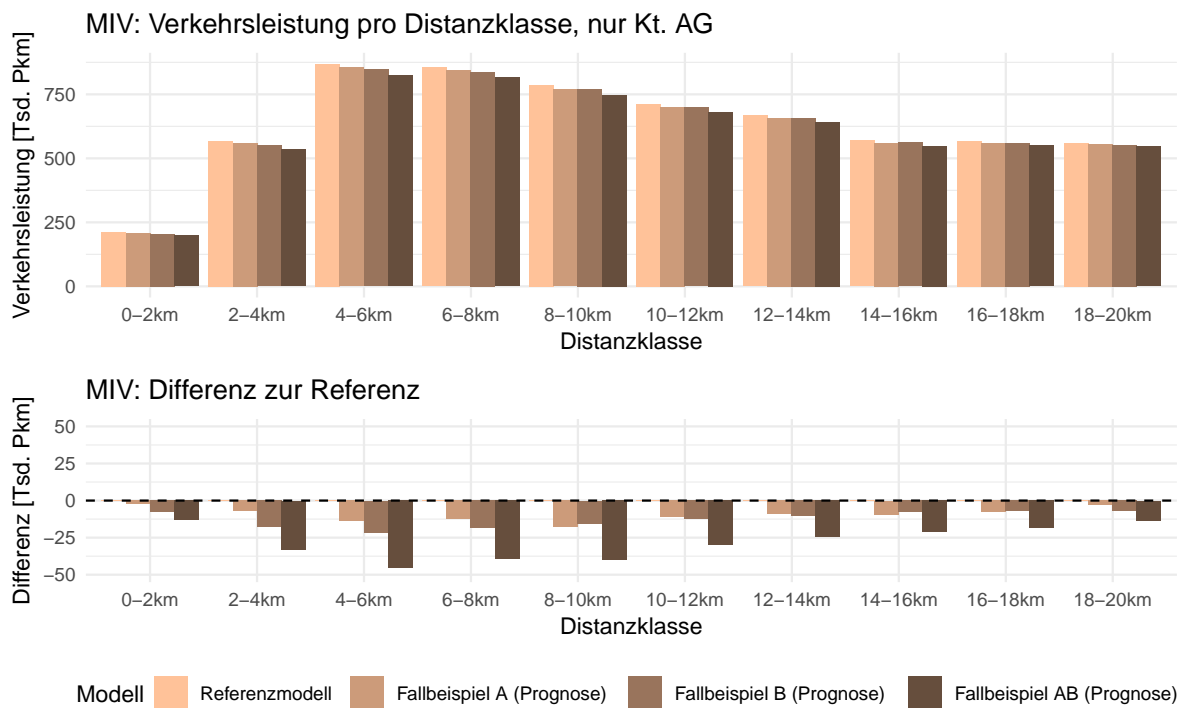
Abbildung 66: Verkehrsleistung Velo nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Eine Vermutung warum der Veloverkehr von der Zunahme des E-Bikes profitiert, scheint die MIV-Belastung zu sein. Im Streckenwahrnehmungsfaktor wird nur die MIV-Belastung abgebildet. Wenn der MIV zugunsten des E-Bikes sich verringert, verringert sich teilweise auch der Widerstand fürs Velo. Die Abnahme der Verkehrsleistung im MIV ist beim Fallbeispiel AB deutlich höher als in den vorherigen Fallbeispielen (Abb. 67).

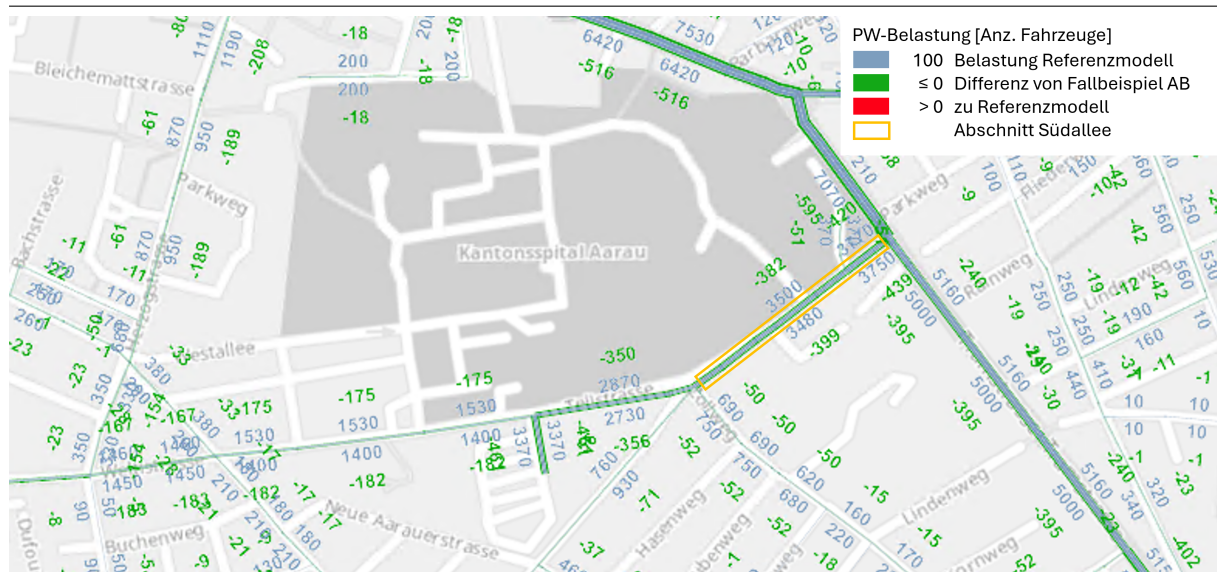
Abbildung 67: Verkehrsleistung MIV nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG



Datengrundlage: Eigene Auswertung basierend auf dem erweiterten KVM-AG

Mit Blick auf die Belastungskarte wird ersichtlich, dass sich der MIV in der Belastung verringert, wenn auch nur moderat im Vergleich zur Gesamtbelastung (Bsp. Abb. 68). Auf ausgesuchten Streckenabschnitten wie der Südallee zeigen sich dennoch Veränderungen um bis zu -10 % in der MIV-Belastung. Zugleich gilt einzuordnen, dass gewisse Hauptverkehrsstrassen aufgrund der Erweiterung mittels Radwegen die MIV-Belastung keinen Einfluss auf den Radverkehr ausübt. Da die Radwege jedoch nicht flächendeckend sondern nur auf den existierenden Velorouten zum Einsatz kommt, ist nur ein Teil des Strassennetzes mit einem Radweg (12,7 %) ausgestattet.

Abbildung 68: KVM-AG Kartenausschnitt Aarau MIV-Belastung



Datengrundlage: Erweitertes KVM-AG

Karte: PTV Visum Ver. 2022

Eine Auswertung des Abschnitts Südallee soll hierbei als kurzes Lesebeispiel dienen. Die Auswertung der Kenngrößen der Strecke zeigt zwei wichtige Punkte auf. Aufgrund der Abnahme an MIV-Belastung nimmt der streckenspezifischer Wahrnehmungsfaktor f_s ebenfalls moderat ab. Der geringe Unterschied kann sich jedoch aufgrund der Addition durchs Netz aufsummieren, wie sich am Beispiel des Hochrechnens auf einen Kilometer zeigt (Tab. 14).

Tabelle 14: Lesebeispiel Abschnitt Südallee (siehe Abb. 68)

	E-Bike			Velo		
	Referenz	AB	Differenz	Referenz	AB	Differenz
Belastung Fahrrad [Fzg]	91	346	255	358	411	53
Belastung MIV [Fzg]	3500	3118	-382	3500	3118	-382
Reine Reisezeit [s]	36,00	36,00	0,00	45,00	45,00	0,00
f_s [-]	1,26	1,24	-0,02	1,28	1,26	-0,02
f_g [-]	1,60	1,60	0,00	2,34	2,34	0,00
Widerstand [s]	72,79	71,41	-1,38	135,15	132,66	-2,49
Widerstand [s/km]	363,93	357,04	-6,89	675,76	663,32	-12,44

Strasseneigenschaften Südallee: Steigung 5,42%; Länge 200 m; v_{0IV} 50 km/h

5.7 Fazit

Die Fallbeispiele zeigen die Stärken und Schwächen der jeweiligen Modellerweiterungen auf. Durch die Überarbeitung der Widerstandsfaktoren im erweiterten Modell wird die Wirkung von verkehrlichen Massnahmen beeinflusst. Dies wird exemplarisch am Fallbeispiel A (Radwege) aufgezeigt. Die stärkere Zunahme des Veloverkehrs im Originalmodell dürfte primär auf den doppelt so hohen Geschwindigkeitszuschlag des Radwegs (+4 km/h) gegenüber dem erweiterten Modell (+2 km/h) zurückzuführen sein. Hierbei rückt jedoch weniger die grundsätzliche Funktionsfähigkeit in den Fokus sondern vielmehr die unterschiedliche Wirkungsintensität. Da für den Radweg unterschiedliche empirische Geschwindigkeitswerte existieren, kann deren exakte Abbildung nicht abschliessend verifiziert werden.

Im Vordergrund steht daher die Funktionsweise und Bedienbarkeit der beiden Modelle. Bei Fragestellungen, die gezielt nur Teile des Radverkehrs betreffen, ist der Einbau von radspezifischen Massnahmen im differenzierten Modell direkter. Dies vermag den zusätzlichen Aufwand des Einbaus eines weiteren Modus teilweise zu relativieren.

Im Gegensatz dazu birgt das Originalmodell mit undifferenzierten Radverkehrsmodus das Risiko, dass radspezifische Kenngrössen (z.B. Geschwindigkeit, Distanzverteilung oder Nutzungsquote) vermischt werden müssen. Die Rückführung solcher radspezifischen Kenngrössen auf ein gemeinsames Radverkehrsprofil erfordert zusätzliche Annahmen, deren Auswirkungen kaum überprüfbar sind. Die Wirkung der Mischrechnung kann nicht verifiziert werden, da das Velo auf die velospezifischen Daten kalibriert wird. Unter Verwendung von Kenngrössen die aus dem gesamten Radverkehr, also Velo und E-Bike stammen, besteht weiterhin die Problematik dass die Kenngrössen bei veränderter Zusammensetzung der Radtypen unverändert bleiben respektive bei Erhöhung neu angepasst werden müssen. Einzig bei der Umlegungskalibrierung fehlen radspezifische Daten gänzlich, wodurch eine Kalibrierung nur auf den gesamten Radverkehr stattfinden kann. Hierbei stellt jedoch die mangelnde Anzahl an Dauerzählstellen die grössere Limitation dar als die fehlende Differenzierung.

Ein weiteres zentrales Ergebnis betrifft die Modellreaktion auf komplexe Massnahmenkombinationen. Wie das Fallbeispiel AB zeigt, können sich Synergieeffekte ergeben, die im Originalmodell nicht ohne Weiteres antizipierbar sind. Zu komplex erscheinen die Zusammenhänge und zu unsicher wären die benötigten Annahmen um einen ähnlichen Effekt wie im erweiterten Modell auszulösen. So wird erst im erweiterten Modell ersichtlich, dass eine verstärkte E-Bike-Nutzung indirekt auch zu einer Zunahme der Velofahrten führen kann. Dabei ist weniger die genaue Vorhersage oder Grössenordnung der Wirkung hervorzuheben, sondern viel mehr das Zusammenspiel von verschiedenen Mechanismen und Wirkungsweisen. Insbesondere das E-Bike scheint aufgrund seiner Eigenschaften an vielen Stellen sehr sensibel ins Modell einzugreifen, sei es durch den geringeren Steigungswiderstand aufgrund der Tretunterstützung oder der kleineren Differenz zur Geschwindigkeit des MIV. Dieser Vorteil gilt es einzuordnen, bedarf es doch weiterer empirischer Grundlagen um die Wirkung und Verlagerung robuster ab-

zubilden. Viele Mechanismen wie beispielsweise eine Fahrradkultur bei zunehmenden hochwertigen Radverkehrsanlagen oder die doch bereits zehn Jahre alten Strukturdaten sowie die geringe Auswirkung von Verkehrsüberlastung im MIV dürften dazu beitragen, dass das aktuelle erweiterte Modell die Effekte unterschätzt.

6 Synthese

Um ein abschliessendes Urteil über den Nutzen der Erweiterungen zu fällen, bedarf es einer Betrachtung im Gesamtkontext. Durch die vorliegende Arbeit wird eine Vielzahl von Modellerweiterungen erprobt und eingebaut, jedoch darf das Gesamtbild und der Zweck eines Verkehrsmodells dabei nicht vergessen gehen. Die Fallbeispiele helfen dabei, die abstrakten Erweiterungen greifbar zu machen und verdeutlichen die Empfindlichkeit und Wirkungsmechanismen des Modells. Insbesondere die technische Differenzierung des existierenden Veloverkehrs in die Modi Velo und E-Bike erweist sich problemlos umsetzbar. Gleichzeitig zeigen die Fallbeispiele die Limitationen in der Vorhersage des E-Bike-Aufkommens auf, was auf die beschränkte Verfügbarkeit von empirischen Daten zurückzuführen ist. Für eine abschliessende Empfehlung sind daher sowohl die Datengrundlage als auch weitere externe Faktoren zu berücksichtigen, insbesondere im Hinblick auf die künftige Entwicklung. Daher gilt es die Umstände zu kontextualisieren, sowie die Grenzen klar zu benennen, um eine vollständige Empfehlung abgeben zu können.

6.1 Einordnung

Wie bereits das Ursprungsmodell zeigt, lässt sich der Veloverkehr in PTV Visum ohne grösseren Aufwand modelltechnisch abbilden. Der Einbau des E-Bikes profitiert direkt davon, dass der Modus Velo bereits implementiert wurde, da viele Wirkungsmechanismen übernommen werden können. Da E-Bikes gemäss Schweizer Recht dieselben signalisierten Radverkehrsanlagen wie Velos benutzen dürfen (ASTRA, 2024), ist der zusätzliche Aufwand beim Einbau gering. Zwar gelten für E-Bikes und S-Pedelecs teils unterschiedliche Vorschriften, doch sind diese im Hinblick auf die im Modell abgebildeten Führungsformen (Radwege, Radstreifen und Mischverkehr) identisch, sofern kein Zusatztafel angebracht ist.

Ohne den bereits erfolgten Einbau des Veloverkehrs, wäre der Einbau des E-Bikes deutlich aufwändiger gewesen. Es stellt sich hierbei die Frage, ob ein Modell, welches den Langsamverkehr nicht abbildet, überhaupt für Fragestellungen des Gesamtverkehrs gedacht ist. Für ein kantonales Verkehrsmodell scheint die wesensgerechte Abbildung des Radverkehrs essentiell.

Die Datenanalyse zeigt, dass E-Bikes eigene Eigenschaften aufweisen, die sie sowohl vom konventionellen Velo als auch von anderen Verkehrsmitteln unterscheiden. Die höheren mittleren Geschwindigkeiten (langsame E-Bikes 14,3 km/h, schnelle E-Bikes 19,6 km/h, Velo 12,6 km/h (BVU AVK, 2023)) sowie die grösseren Etappenlängen (langsame E-Bike 5,7 km, Velo 3,5 km) deuten auf ein relevantes Verlagerungspotenzial hin. Insbesondere da im Kanton Aargau über die Hälfte (54 %) der Ausgänge mit einer Länge zwischen 5,1 bis 7 km mit dem Auto zurückgelegt werden (BVU AVK, 2023).

Die Fallbeispiele verdeutlichen, dass das E-Bike insbesondere auf mittleren Distanzen deutlich konkurrenzfähiger mit dem MIV ist als das konventionelle Velo. Dies äussert sich in markanten Veränderungen der Verkehrsleistung, etwa in den Fallbeispielen B und AB. Dieses Poten-

zial wurde auch auf Bundesebene erkannt, etwa durch den geplanten Bau von Velobahnen zur Entlastung des Strassennetzes (Bundesrat, 2024). Da deren Planung jedoch Aufgabe der Kantone ist, rücken erstmals grossräumige, reine Radverkehrsinfrastrukturen ins Handlungsfeld kantonaler Verkehrsmodelle. Vor diesem Hintergrund und gestützt auf die Ergebnisse der Fallbeispiele erscheint eine explizite Abbildung des E-Bikes in zukünftigen Modellanwendungen als sinnvoll und machbar.

E-Bikes erreichen in den Beobachtungen meistens ihre eigene Fahrgeschwindigkeit. Dies lässt sich wohl unter anderem durch ein einfacheres Überholen von anderen Radfahrenden erklären. Auch bei Steigungen zeigen sich Vorteile, nicht zuletzt durch die elektrische Tretunterstützung. Zudem ist die Nutzung für den Reisezweck Arbeiten und Besorgungen überdurchschnittlich hoch (2,0 % bzw. 2,2 % gegenüber 1,5 % im Durchschnitt im MZMV 2021 für das Gebiet KVM-AG).

Die Erweiterung um ein radtypenspezifisches Verhaltensmodell erscheint damit sowohl modelltechnisch als auch empirisch gerechtfertigt. Im Rahmen der Fallbeispiele konnte ihre Funktionalität erprobt werden. Die Auswahl und der Einbau von Erweiterungen sollte jedoch prioritär dort erfolgen, wo eine Relevanz für künftige Planungsfragen absehbar ist. Erweiterungen mit hohem Aufwand und unklarer Anwendungsperspektive sind zu vermeiden auch im Hinblick auf die Pflege und Handbarkeit des Modells.

Neben möglichen Zukunftsszenarien bestehen auch bereits geltende gesetzliche Anforderungen, die das Verkehrsmodell betreffen. Das Veloweggesetz verpflichtet die Planungsbehörden zur Erarbeitung eines flächendeckenden Netzes für Alltags- und Freizeitradverkehr (BV, 2023). Die Praxishilfe zur Velowegnetzplanung (Starkermann et al. 2024) sieht dabei eine neue Hierarchie von Velobahnen, Haupt-, Neben- und Erschliessungsverbindungen vor. Aufgrund begrenzter finanzieller Mittel wird die Frage nach der Priorisierung des Netzausbaus künftig wichtiger, ein Aspekt, der gezielt durch das KVM-AG unterstützt werden sollte. Es scheint in naher Zukunft daher nicht an fahrradspezifischen Fragestellungen zu mangeln.

6.2 Daten- und Modellgrenzen

Der Einbau radtypenspezifischer Eigenschaften verdeutlicht ein zentrales Problem. Die Datengrundlage im Bereich des Radverkehrs ist oftmals unzureichend. Zahlreiche Modellerweiterungen stützen sich nur teilweise auf empirisch gesicherte Informationen, was die Kalibrierung und Auswertung erschwert. Dies zeigte sich bereits zu Beginn des Einbaus des E-Bikes. Aufgrund fehlender Daten wurde auf eine weitere Differenzierung in schnelle und langsame E-Bikes verzichtet. Zwar liefert der MZMV nach Radtypen differenzierte und periodisch erhobene Daten, doch machen E-Bikes im Modalsplit des Untersuchungsgebiets (KVM-AG) nur rund 1,5 % aus (MZMV von 2021, BFS und ARE, 2023). Entsprechend gering ist auch die Zahl der beobachteten Fahrten. Dadurch basiert die Erweiterung, trotz Zusammenfassung der E-Bike-Typen, auf einer sehr dünnen Datenbasis. Dies führt etwa bei der Kalibrierung auf ÖV-Güteklassen zu

grossen Konfidenzintervallen und entsprechend hohen Unsicherheiten in den Simulationsergebnissen.

Ein weiteres Problem bei der Modellierung des Radverkehrs ist die Absenz einheitlicher Kenngrössen für das radtypenspezifisches Verhalten. Zwar existieren nationale und internationale Studien zum Routenwahlverhalten, die beispielsweise die Reaktion auf Steigung, MIV-Belastung oder Ausbaustandard untersuchen, doch variiert deren methodische Herangehensweise erheblich. Entsprechend fehlt es an klar definierten Widerstandsgrössen. Der streckenspezifische Wahrnehmungsfaktor f_S stellt daher einen ersten Versuch dar, diese Effekte abzubilden. Die genaue Bewertungsgrösse lässt sich jedoch empirisch nicht genau festlegen und wird unter anderem auf Basis des Ursprungsmodells gewählt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Sensibilität der Wahrnehmung sich zwischen den Radtypen nicht nur aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz unterscheidet. Ebenso ist damit zu rechnen, dass der maximale Widerstand je nach signalisierter Höchstgeschwindigkeit auch in der Wirkungsgrösse variiert. Aussagen zur Reaktion auf einzelne Streckenabschnitte bleiben deshalb mit Unsicherheit behaftet. Der Einbau erfolgte dennoch, da aus pragmatischer Sicht ein Modell auf die Streckeneigenschaften reagieren können muss, auch wenn die genaue Wirkung nicht bekannt ist.

Dies wird auch aus der Planung verlangt, denn der Einbau von f_S orientiert sich an aktuellen Normen und Empfehlungen, wie etwa dem neusten Entwurf der VSS-Norm (2025) oder dem Masterplan Veloinfrastruktur der Stadt Bern (2023). Diese geben Hinweise zum Zusammenspiel von Infrastrukturtyp, MIV-Belastung und erlaubter Höchstgeschwindigkeit. Zwar ist die Wirkung solcher Faktoren empirisch belegt (vgl. Meister et al. 2022; Meyer de Freitas und Axhausen, 2023; Broach, Gliebe und Dill, 2010), jedoch fehlen einheitliche, für die Verkehrsmodellierung geeignete Bewertungsgrösse sowie deren kombinierte Effekte. Trotzdem wird der Faktor eingebaut, um die Wirkung infrastruktureller Veränderungen abzubilden. Eine empirische Validierung wäre jedoch erstrebenswert.

Ein weitere modellspezifische Einschränkung liegt in der mangelnden Differenzierung nach Anspruchsgruppen. Zwar unterscheiden sich Nutzerinnen und Nutzer teils erheblich in ihrer Wahlentscheidung, doch ist eine feinere Segmentierung aus daten- und pflegetechnischen Gründen derzeit nicht umsetzbar. Je mehr Gruppen abgebildet werden, desto aufwändiger ist die benötigte Datengrundlage. Der Radverkehr ist jedoch, nicht nur wegen den Radtypen, sehr heterogen aufgestellt, was die Abbildung in einem aggregierten Modell erschwert.

Hinzu kommen zeitliche Verzerrungen durch die zugrunde liegenden Strukturdaten. Teile des Modells basieren auf Erhebungen aus dem Jahre 2015. Seither ist die Bevölkerung im Kanton Aargau um 11,3 %, in Städten wie Baden gar um über 25 % gewachsen (Aargau, 2025). Es ist daher anzunehmen, dass der heutige Radverkehrsanteil unterschätzt wird. Besonders die Kalibrierung auf den MZMV 2021 ist vor dem Hintergrund der Pandemie kritisch zu betrachten, da Verkehrsmuster in dieser Zeit atypisch waren. Gleichzeitig schreitet der Ausbau des Veloroutennetzes dynamisch voran, beispielsweise durch neue Infrastrukturen wie das Fahrradparkhaus am Bahnhof Aarau (Rohner, 2021), was im Modell aber auch empirischen Beobachtungen noch

nicht berücksichtigt ist.

Auch technologische Entwicklungen beeinflussen den Radverkehr. Die E-Bike-Verkäufe stiegen zwischen 2015 und 2024 markant an, um 267 % bei langsamen und 121 % bei schnellen E-Bikes (Velosuisse, 2025). Welche langfristigen Auswirkungen dieser Trend auf das Mobilitätsverhalten hat, ist unklar, insbesondere angesichts möglicher Sondereffekte während der Pandemie.

Ein letzter Punkt betrifft die fehlende Kalibrierung der Umlegung. Mangels flächendeckender Dauerzählstellennetze mit Fahrradtypendifferenzierung ist dies derzeit nicht möglich. Neue Technologien wie bildgestützte KI-Auswertung könnten hier künftig Abhilfe schaffen.

Insgesamt zeigt sich, dass für die realitätsnahe Abbildung des heterogenen Fahrradverkehrs mehr empirische Grundlagen sowie methodische Weiterentwicklungen nötig wären. Gleichzeitig erfordert die Modellpflege stets einen Ausgleich zwischen Differenzierung und Handhabbarkeit. Ziel muss es sein, trotz Vereinfachung eine hinreichende Massnahmensensitivität sicherzustellen.

6.3 Handlungsempfehlung

Der Radverkehr, insbesondere deren Zusammensetzung, befindet sich in einem dynamischen Wandel. Gesetzliche Vorgaben, technologische Fortschritte bei Tretunterstützung und Batterien sowie eine zunehmend volatile Verkehrspolitik verändern die Rahmenbedingungen laufend. Dazu kommt, dass bereits ausgelöste Trends, wie etwa durch die Pandemie oder die Verbreitung der E-Bikes, in ihrer langfristigen Wirkung kaum verlässlich quantifizierbar sind. Unter diesen Umständen ist die nachfolgende Empfehlung als gegenwartsbezogene Einschätzung zu verstehen, die sich mit neuen Daten und politischen Entwicklungen rasch verändern kann.

Rein quantitativ erscheint der zusätzliche Nutzen für die differenzierte Abbildung von E-Bikes bei einem Anteil von rund 1,5 % am Modalsplit im Jahre 2021 (MZMV von 2021, Modellgebiet KVM-AG) gering. Dennoch kann die Einführung eines radtypenspezifischen Verhaltensmodells einen qualitativen Mehrwert schaffen, insbesondere vor dem Hintergrund künftiger Fragestellungen.

Durch die erstmalige Aussicht auf grosse Radinfrastrukturprojekte, wie beispielsweise Velobahnen, und eine Neuordnung der Fahrradhierarchien kann eine differenzierte Betrachtung der Radtypen von grosser Bedeutung sein, da sich E-Bikes, aufgrund ihrer höheren Fahrgeschwindigkeit und Reichweite, wesentlich anders verhalten als konventionelle Velos. Gerade in Agglomerationen und hochbelasteten Korridoren ist davon auszugehen, dass E-Bikes eine zentrale Rolle in der Modalkonkurrenz zum MIV spielen werden. Eine differenzierte Modellierung erlaubt hier robustere Aussagen zur Wirkung von Massnahmen, vorausgesetzt, die Datenbasis ist ausreichend vorhanden. In naher Zukunft dürften daher genügend radtypenspezifische Fragestellungen auf das KVM-AG zukommen, etwa in Form von Priorisierung der Fahrradnetzausbauten, der gezielten Allokation von Fördermitteln oder der Bewertung von grossräumigen

LV-Verbindungen.

Aus modelltechnischer Sicht ist der Einbau eines radtypenspezifischen Modells bereits heute einwandfrei umsetzbar. Durch den existierenden Modus Velo wurde bereits ein grosser Teil des Modellierungsaufwandes geleistet. Eine weitere Differenzierung des Fahrradverkehrs kann an diesen Modus anknüpfen und muss nur punktuell angepasst werden. Der grösste Aufwand besteht hierbei in der neuen Kalibrierung, die für jeden Modus einzeln vorgenommen werden muss und eine entsprechende Datengrundlage (i.e. differenzierte Radtypen) voraussetzt.

Die grösste Herausforderung bleibt die lückenhafte Datengrundlage. Zwar liefert der MZMV radtypenspezifische Beobachtungen, doch fehlen insbesondere flächendeckende Aufnahmen (z.B. Zählraten) sowie empirisch abgesicherte Wirkungskenngrössen. Mit den laufenden Forschungsprojekten *EBIS* und *Nachfragepotenziale des Veloverkehrs* ist mittelfristig mit einer deutlichen Verbesserung der Datenlage zu rechnen. Die Weiterentwicklung des Modells unter Einbezug radtypenspezifischer Komponenten scheint in Folge mittelfristig als unumgänglich. Eine Rückführung von bereits differenziert vorhandenen Daten auf einen allgemeinen Fahrradmodus erscheint hingegen wenig zielführend. Insbesondere für Fragestellungen, die eine flexible Verschiebung der Fahrradtypenzusammensetzung erfordern, ist die Abbildung des E-Bikes als eigener Modus zentral. Eine Beibehaltung eines einheitlichen Fahrradmodus hingegen birgt das Risiko, relevante Unterschiede, etwa bei Steigungswiderständen, Etappenlängen oder Sensitivitäten zu nivellieren. Gerade unter der Annahme einer sich dynamisch entwickelnden Fahrradzusammensetzung wäre dies ein Verlust an prognostischer Qualität.

Die weitere Differenzierung von schnellen und langsamen E-Bikes ist ebenfalls eine Frage, die sich aufdrängt, erreicht ein schnelles E-Bike doch mit 45 km/h eine um 20 km/h höhere Höchstgeschwindigkeit als langsame E-Bikes. Die Frage nach der Differenzierung stellte sich aufgrund der aktuellen Datenlage von Beginn an nicht. Lägen genügend Daten vor, gilt es abzuschätzen, welchen Mehrwert eine weitere Differenzierung für die Aussagekraft hat im Verhältnis zu den Fragestellungen. Das schnelle E-Bike hat mit 19,6 km/h mittlere Geschwindigkeit eine höhere Geschwindigkeit als das E-Bike mit 14,3 km/h (BVU AVK, 2023), jedoch ist die mittlere Etappenlänge fast identisch zwischen beiden E-Bike-Typen. Einen Einbau scheint sich daher erst zu lohnen, wenn entweder explizite Fragestellungen aufkommen, oder sich das schnelle E-Bike drastisch vom langsamen E-Bike unterscheidet. Die Frage, ob dies der Fall ist, stellte sich zu Beginn der Arbeit aufgrund der Datengrundlage nicht. Es gilt daher weitere Untersuchungen vorzunehmen, sollte die Datenlage sich für die schnellen E-Bikes verbessern.

Es gilt abschliessend den richtigen Zeitpunkt für eine umfassende Erweiterung mit einem radtypenspezifischen Verhaltensmodell zu wählen. Der Einbau von E-Bikes scheint reif zu sein, insbesondere mit Blick auf die jüngsten Verkaufszahlen, wobei fast jedes zweite verkaufte Fahrrad ein E-Bike ist (Velosuisse, 2025). Die eigentliche Einschränkung liegt in der unzureichenden Datengrundlage für die Modellierung. Der aktuellste MZMV von 2021 ist pandemiebedingt verzerrt, der letzte unbeeinflusste Erhebung somit fast eine Dekade her. Eine Umsetzung zum jetzigen Zeitpunkt ist daher mit einer grossen Unsicherheit behaftet. Es empfiehlt sich, auf die

baldige Veröffentlichung des MZMV von 2025 abzuwarten. Die Differenzierung kann vorbereitet, jedoch frühestens mit Vorliegen der nächsten MZMV-Erhebung umgesetzt werden. Hinzu muss beachtet werden, dass insbesondere die genauen Bewertungsparameter nicht bekannt sind, diese sich teilweise durch Annahmen jedoch überbrücken lassen. Ein vollständiger Einbau sollte jedoch erst nach Prüfung und Vorliegen einer ausreichender Datenbasis erfolgen, um belastbare, nachhaltige und nachvollziehbare Modellergebnisse zu erhalten.

7 Danksagung

Der Weg bis zum Abschluss dieser Masterarbeit war nicht nur eine fachliche sondern auch eine persönliche Reise. Ohne das Engagement und die Unterstützung meiner Kollegen und Kommilitonen wäre dieser Weg kaum möglich gewesen.

An dieser Stelle möchte ich mich daher bei allen Personen bedanken, die mich auf meinem akademischen Weg bisher begleitet haben. Mein besonderer Dank gilt meinen Experten Simon Schmutz (Kt. Aargau), Robert Simon (TransOptima) und Claude Weis (TransOptima), welche mich mit ihrem breiten Wissen aus der Praxis in der Masterarbeit unterstützt haben.

Ebenso danke ich den Fachpersonen, die mich in die Welt der Verkehrsplanung eingeführt und mir wertvolle Unterlagen sowie Daten zur Verfügung gestellt haben. Ich habe die Gemeinschaft in diesem Fachbereich als stets offen und hilfsbereit erlebt. Der Zugang zu Wissen war unkompliziert und direkt. Diese Kultur des aktiven Wissenstransfers habe ich sehr zu schätzen gelernt und möchte mich dafür bedanken.

Ein besonderer Dank gebührt schliesslich Alex Erath, der mir ein vertieftes Studium der Verkehrsplanung über mehrere Semester hinweg erst ermöglichte. Ohne seine Unterstützung und Weitsicht bei der Betreuung dieser sowie früherer Arbeiten wäre eine solch fundierte Ausbildung nicht zu erreichen gewesen. Neben der engen fachlichen Betreuung möchte ich insbesondere seine Unterstützung beim Verfolgen und Vorantreiben meiner Ziele hervorheben. Ohne diese engagierte und vertrauensvolle Begleitung wäre der Abschluss meines Studiums kaum realisierbar gewesen.

Auch der frühzeitige Einbezug in Projekte des Fachbereichs sowie der Zugang zu Kooperationspartnern und relevanten Netzwerken haben mich nicht nur fachlich, sondern auch persönlich bereichert. Dafür danke ich Alex und dem gesamten Team des Fachbereichs Verkehr und Mobilität, insbesondere Michael van Eggermond und Tim Cotti, die mich über all die Jahre hinweg begleitet, beraten und inspiriert haben. Merci vielmol!

Glossar

Analysemodell Beschreibt das Modell im IST-Zustand. Das Analysemodell wird verwendet, um den aktuellen oder definierten Zustand zu kalibrieren. Im Analysemodell sind die berechnete Nachfrage und Verkehrszusammensetzung starr. Es kann jedoch auch dazu verwendet werden, um einzelne Fragestellungen, welche nur die Umlegung betreffen, zu bearbeiten.

ARE Bundesamt für Raumentwicklung: Fachbehörde für Raumplanung, Gesamtverkehr und nachhaltige Entwicklung der Schweiz.

AVK Abteilung Verkehr des Departements Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau.

BFS Bundesamt für Statistik: Nationales Kompetenzzentrum der öffentlichen Statistik der Schweiz.

BVU Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau.

KVM-AG Kantonales Verkehrsmodell Aargau.

LV Langsamverkehr: Beschreibt klassischerweise die Fortbewegung mittels eigener Muskelkraft wie zu Fuss, Velo oder Trottinett. Mittlerweile wird auch die Fortbewegung mit elektrischer Unterstützung wie E-Bike oder E-Scooter dazu gezählt. Weitere Infos: astra.admin.ch/langsamverkehr

MIV Motorisierter Individualverkehr.

Modalsplit Beschreibt die Aufteilung des Verkehrsaufkommens auf die verschiedenen Verkehrsmittel. Das Wort stammt aus einer Zusammensetzung von lat. «Modal» für Art und eng. «to split» aufteilen.

MZMV Mikrozensus Mobilität und Verkehr: Statistische Erhebung zur Mobilität der Schweizer Bevölkerung. Wird alle fünf Jahre durchgeführt vom Bundesamt für Statistik. Weitere Infos: bfs.admin.ch.

Prognosemodell Beschreibt das Modell im SOII-Zustand. Das Prognosemodell wird verwendet, um den gewünschten oder zukünftigen Zustand zu berechnen. Im Prognosemodell sind die berechnete Nachfrage und Verkehrszusammensetzung frei und orientieren sich an den Lösungen des Analysezustandes. Es kann dazu verwendet werden, um grössere Fragestellungen, welche weite Modellteile betreffen, zu bearbeiten. Im KVM-AG sind dies beispielsweise die Prognosezustände 2030 und 2040.

Referenzmodell Ein Verkehrsmodell, das den aktuellen oder definierten Zustand des Verkehrsnetzes und der Verkehrsnachfrage abbildet. Im vorliegenden KVM-AG ist unter Referenzmodell das um Radtypen erweiterte und kalibrierte KVM-AG mit Daten aus 2021 zu verstehen. Es dient als Vergleichsgrundlage für weitere Szenarien wie dem Prognosemodell..

Ursprungsmodell Unter Ursprungsmodell, oder Originalmodell, wird das unberührte Modell

KVM-AG beschrieben, wie es vom Kanton zur Verfügung gestellt wurde. Es basiert auf dem Zustand von 2015 und wurde im Rahmen der OASE-Erweiterungen von 2022 mit weiteren velospezifischen Kenngrössen überarbeitet. Es stellt folglich den Ist-Zustand ab und ist damit ein Analysemodell.

ÖV Öffentlicher Verkehr.

Literaturverzeichnis

- Aargau, Kanton (2025). *Bevölkerung - Kanton Aargau*. Aarau: Departement Finanzen und Ressourcen. URL: http://www.ag.ch/de/themen/staat-politik/statistik/publikationen-und-analysen?dc=412ea8b9-10fc-44df-9b0f-7cddc9782ff5_de (besucht am 28.07.2025).
- ARE (2016). *Verkehrsperspektiven 2040*. Grundlagen Art.-Nr. 812.104.d. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Raumentwicklung ARE. URL: https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/verkehr/publikationen/Verkehrsperspektiven_2040_Broschuere.pdf.download.pdf/Verkehrsperspektiven_2040_Broschuere_de.pdf (besucht am 04.06.2025).
- ASTRA (2024). *Die Bedeutung der Radverkehr-Signalisation auf einen Blick – gültig ab 1. Juli 2025*. Bern: Bundesamt für Strassen. URL: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/Vernehmlassung-Verkehrsflaechen/uebersichtstabelle_bedeutung_radverkehr-signalisation.pdf.download.pdf/Uebersichtstabelle_Bedeutung_Radverkehr-Signalisation_2025.pdf (besucht am 30.07.2025).
- AVK, BVU (2016). *Strategie Kanton Aargau mobilitätAARGAU*. Aarau: Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Verkehr. URL: <https://www.ag.ch/media/kanton-aargau/bvu/mobilitaet-und-verkehr/gesamtverkehrsplanung/2016-12-22-brosch-mobilitaet-v2-150dpi.pdf> (besucht am 02.07.2025).
- (2022). *Standbericht Strategie mobilitätAARGAU*. Aarau: Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Verkehr. URL: <https://www.ag.ch/media/kanton-aargau/bvu/mobilitaet-und-verkehr/strategie-mobilitaetaargau/bvu-2217-standbericht-mobilitaet-verlinkt-rz3.pdf> (besucht am 02.07.2025).
- Bern, Verkehrsplanung Stadt (2023). *Masterplan Veloinfrastruktur Standarts*. Bern: Direktion Tiefbau, Verkehr und Stadtgrün.
- BFS und ARE (2017). *Verkehrsverhalten der Bevölkerung: Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*. Unter Mitarb. von Ferenc Biedermann und Christian Perret. OCLC: 993713985. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik (BFS). ISBN: 978-3-303-11262-5.
- (2023). *Mobilitätsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021*. Neuchâtel und Bern: Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung.
- Broach, Joseph, John Gliebe und Jennifer Dill (2010). *Bicycle route choice model developed using revealed preference GPS data*. Washington D.C.

- Bundesrat (2024). *Die Bedeutung von Velobahnen im Verkehrssystem der Schweiz*. Bern: Schweizerische Eidgenossenschaft. URL: <https://www.news.admin.ch/de/nsb?id=100651> (besucht am 21.07.2025).
- BV (2023). *Bundesgesetz über Velowege (Veloweggesetz)*. URL: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/oc/2022/790/de> (besucht am 02.07.2025).
- BVU (2015). *Raumkonzept Aargau*. Kanton Aargau. URL: <https://www.ag.ch/media/kanton-aargau/bvu/raumentwicklung/grundlagen-und-kantonalplanung/richtplanung/richtplantext/r1.pdf> (besucht am 02.07.2025).
- BVU AVK, Kt. AG (2023). *Mobilitätsverhalten der Aargauer Bevölkerung Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021*. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Verkehr. URL: <https://www.ag.ch/media/kanton-aargau/bvu/mobilitaet-und-verkehr/verkehrsdaten/bericht-mzmv2021-kanton-aargau-de.pdf> (besucht am 06.03.2025).
- (2024). *Neues Verkehrsmodell Kanton Aargau KVM-AG*. Modellhandbuch. Aarau: Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Verkehr, Verkehrsplanung. URL: <http://www.ag.ch/de/verwaltung/bvu/mobilitaet-verkehr/mobilitaet/verkehrsdaten/verkehrsmodell-kvm-ag> (besucht am 03.07.2024).
- Eggermond, Michael A. B. van van et al. (2024). *Nachfragepotenziale des Veloverkehrs*. Zwischenbericht. Muttenz.
- Fiabane, Noè (2025). *Differenzierte Abbildung des Veloverkehrs im Kantonalen Verkehrsmodell Aargau*. Vertiefungsprojekt. Publisher: Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik FHNW. Muttenz: Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik FHNW. URL: <https://irf.fhnw.ch/handle/11654/51900> (besucht am 01.07.2025).
- Li, Haojie, Daniel J. Graham und Arnab Majumdar (2012). „The effects of congestion charging on road traffic casualties: A causal analysis using difference-in-difference estimation“. In: *Accident Analysis & Prevention*. PTW + Cognitive impairment and Driving Safety 49, S. 366–377. ISSN: 0001-4575. DOI: 10.1016/j.aap.2012.02.013. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457512000681> (besucht am 02.07.2025).
- Meister, Adrian et al. (2022). „Route choice modelling for cyclists on dense urban networks“. In: *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung* 1764. Accepted: 2022-08-04T06:36:48Z Publisher: IVT, ETH Zurich. DOI: 10.3929/ethz-b-000561710. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/561710> (besucht am 10.01.2023).
- Meyer de Freitas, Lucas und Kay W. Axhausen (2023). „Route choice preferences of cyclists in Switzerland: A SP-survey as part of the EBIS project“. In: Artwork Size: 16 slides Medium: application/pdf Publisher: ETH Zurich, 16 slides. DOI: 10.3929/ETHZ-B-000616006. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/616006> (besucht am 30.12.2024).

- Minitab (2025). *Methods and formulas for goodness-of-fit statistics in Fit Regression Model and Linear Regression*. URL: https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/methods-and-formulas/goodness-of-fit-statistics/?utm_source=chatgpt.com (besucht am 20.06.2025).
- Rohner, Nadja (2021). *274 neue öffentliche Veloplätze für die Bahnhofpendler*. Aargauer Zeitung. URL: <https://www.aargauerzeitung.ch/aargau/aarau/aarau-274-neue-oeffentliche-veloplaetze-fuer-die-bahnhofpendler-ld.2182631> (besucht am 28.07.2025).
- SebStDD (2020). *How does R compute r.squared for weighted least squares*. Cross Validated. URL: <https://stats.stackexchange.com/a/444532> (besucht am 20.06.2025).
- Starkermann, Marco et al. (2024). *Praxishilfe Velowegnetzplanung*. 165. Bern: Bundesamt für Strassen und Velokonferenz Schweiz. URL: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/langsamverkehr/praxishilfe_velowegenetzplanung.pdf.download.pdf/Praxishilfe%20Velowegnetzplanung.pdf.
- Velosuisse (2025). *Statistik Neuverkäufe Velosuisse 2012 - 2024*. URL: <https://www.velosuisse.ch/category/statistik/> (besucht am 04.04.2025).
- Visum, PTV (2023). *PTV Visum 2022 – Handbuch*. Handbuch. Haid-und-Neu-Str. 15, 76131 Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH.
- VSS (2025). *SN 640060 Veloverkehr Grundlagen und Projektierung Entwurf*.
- Weis, Claude und Milenko Vrtic (2022). *OASE: Modellrechnungen KVM AG*.

Abbildungsverzeichnis

1	Übersichtskarte Zonengebiete KVM-AG	13
2	Vereinfachter Verfahrensablauf KVM-AG	14
3	Formel zur Bestimmung der Velogeschwindigkeit im KVM-AG	19
4	Steigungsfaktor im KVM-AG	20
5	MIV-Belastungsabhängiger Widerstandsfaktor	21
6	Verteilung der Beobachtungen des MZMV im Modellgebiet KVM-AG	25
7	Übersicht Einbaumethodik Modalsplit	27
8	Einbau und Reaktion unterschiedlicher Velo-Geschwindigkeiten im KVM-AG auf die Distanzverteilung	30
9	Einbau und Reaktion unterschiedlicher E-Bike-Geschwindigkeiten im KVM-AG auf die Distanzverteilung	31
10	Geschwindigkeiten in Steigungen in Nachfragepotentiale des Veloverkehrs (NP) und KVM-AG (Steigungsfaktoren übersetzt in Geschwindigkeit zur Vergleichbarkeit mit NP)	32
11	Verteilung der Längsneigungen im KVM-AG	33
12	Vorschlag Erweiterung Steigungsgeschwindigkeit (Steigungsfaktoren übersetzt in Geschwindigkeit zur Vergleichbarkeit mit NP)	34
13	Reisezeitisochronen vor (links) und nach (rechts) Anpassung Steigungsfaktor	35
14	Infrastruktur- und geschwindigkeitsabhängiger MIV-Faktor (Velo)	38
15	Streckenspezifischer Wahrnehmungsfaktor (Velo und E-Bike)	39
16	Distanzverteilung ohne (links) und mit Rüstzeit (rechts)	40
17	Einbau Raumtypen	42
18	Knotendichte nach Distanz und Raumtypenbeziehung	43
19	Knotendichteverteilung nach Raumtypenbeziehung	44
20	Eingebaute Aufwandsart Knotenanzahl	45
21	Einfluss des Knotendichteaufwands Modus Velo auf Relation Kern nach Kern	46
22	Einfluss Knotendichte E-Bike Kern-Kern	47
23	Durchschnittliche Anzahl Fahrräder pro Person (ganze Schweiz)	48
24	Durchschnittliche Anzahl Fahrräder pro Person (Kt. Aargau)	49
25	Vergleich Modalsplit und Nutzungsquote von Velos (links) und E-Bikes (rechts)	51
26	Verschneidung von Gebäudegrundrissen und ÖV-Güteklasse nach Zonen des KVM-AG am Beispiel Gebenstorf	53
27	Ausschnitt der erweiterten Strukturdaten im KVM-AG	54
28	Formel für Attribut Nutzungsquotenaffinität E-Bike	55
29	Aufwandsart Nutzungsquote E-Bike	56
30	Nutzungsquoten E-Bike nach Gewichtung und Einbau ins KVM-AG, sortiert nach dominierender ÖV-Güteklasse	57

31	Nutzungsquoten Velo nach Gewichtung und Einbau ins KVM-AG, sortiert nach dominierender ÖV-Gütekategorie	58
32	Besitzquote, Modalsplit und Nutzungsquote von Velos (links) und E-Bikes (rechts)	59
33	Matrixformel für Velo- und E-Bike-Affinität	61
34	Kalibrierung nach Raumtypenbeziehung	63
35	Formel mit Hilfsgrößen für Attribut Nutzungsquotenaffinität E-Bike	64
36	Kalibrierung nach ÖV-Gütekategorie	65
37	Auswertung MZMV für Modus Velo nach Zweck Einkaufen	67
38	Auswertung MZMV für Modus Velo nach Zweck Arbeiten	68
39	Auswertung MZMV für Modus Velo nach Zweck Arbeiten	69
40	Transformationsfunktion der Reisezeit mittels Box-Tukey	70
41	Kalibrierung Reisedistanz für Zweck Einkaufen	71
42	Überarbeitete MIV-Faktor-Formel (E-Bike) im KVM-AG	72
43	Vergleich Modalsplit kalibrierte Version ohne und mit neuem MIV-Faktor	73
44	Vergleich zwischen bestehenden verkehrsmengen- und neuem strecken- und verkehrsmengen-spezifischem Wahrnehmungsfaktor am Ausschnitt Aarau (rot mehr Velonachfrage, grün weniger Velonachfrage mit neuem Ansatz)	74
45	Umlegungsmodell: Vergleich zwischen bestehendem verkehrsmengen- und neuem strecken- und verkehrsmengen-spezifischem Wahrnehmungsfaktor am Ausschnitt Aarau-Suhr (rot mehr Velonachfrage, grün weniger Velonachfrage mit neuem Ansatz)	75
46	Zonenvergleich dominierende ÖV-Gütekategorie und Raumtyp	76
47	Umstellung von Analyse auf Prognose in der EVA-Verteilung	79
48	Ausschnitt des vorhandenen Veloroutennetzes im KVM-AG	81
49	Anpassung Formelattribut Velo-Geschwindigkeit	82
50	Anpassung Formelattribut Velo-Widerstand	82
51	Anpassung Formelattribut Velo-Widerstand	83
52	Kumulative Verkehrsleistung Modus Velo innerhalb Kt. AG	85
53	Verkehrsleistung Velo nach Distanzklassen gesamtes KVM-AG	86
54	Kumulative Verkehrsleistung aller Modi innerhalb Kt. AG nach Distanz	87
55	Verkehrsleistung MIV nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG	88
56	Verkehrsleistung ÖV nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG	89
57	Verkehrsleistung E-Bike nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG	90
58	DvD-Analyse der mittleren Wegdistanzen Fallbeispiel A	91
59	DvD-Analyse bezüglich der Veränderung des Veloanteils nach Raumtypenbeziehung	92
60	Anpassung Nutzungsquotenformel im erweiterten Modell	93
61	DvD-Analyse der mittleren Wegdistanzen Fallbeispiel B	96
62	DvD-Analyse der mittleren Wegdistanzen Fallbeispiel AB	98
63	Verkehrsleistung aller Fallbeispiele und Modi innerhalb Kt. AG	100

64	Anzahl Wege aller Fallbeispiele und Modi innerhalb Kt. AG	101
65	Verkehrsleistung E-Bike nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG	102
66	Verkehrsleistung Velo nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG	103
67	Verkehrsleistung MIV nach Distanzklassen innerhalb Kt. AG	104
68	KVM-AG Kartenausschnitt Aarau MIV-Belastung	105
69	Einbau Fahrzweck-Modal-Split in KVM-AG	124

Tabellenverzeichnis

1	Anzahl im MZMV verfügbare Beobachtungen (Wege) im Modellgebiet nach Modus	26
2	Geschwindigkeitsinventar für den Radverkehr im KVM-AG	28
3	Übersicht Raumtypenvereinfachung	42
4	Modalsplit nach ÖV-Güteklasse	50
5	Modalsplit nach Raumtypenbeziehung im Gebiet KVM-AG	61
6	Vgl. E-Bike-Nutzungsquote vor und nach der Kalibrierung	66
7	Vgl. Velo-Nutzungsquote vor und nach der Kalibrierung	66
8	Globaler Modalsplit im KVM-AG für Fallbeispiel A: Velorouten sind Radwege . .	84
9	Kantonaler Modalsplit im KVM-AG für Fallbeispiel A: Velorouten sind Radwege .	84
10	Vergleich kantonaler Modalsplit im KVM-AG für Fallbeispiel Nutzungsquote von erweitertem Modell zum Ursprungsmodell	95
11	Differenz des kantonalen Modalsplits im KVM-AG von Referenzzustand zu Fall- beispiel Nutzungsquote	96
12	DvD für Fallbeispiel Nutzungsquote	97
13	Übersicht der Veränderungen des Modalsplits je Fallbeispiel	99
14	Lesebeispiel Abschnitt Südallee (siehe Abb. 68)	105

Anhang

A1 Modal-Split-Anpassung

Abbildung 69: Einbau Fahrzweck-Modal-Split in KVM-AG

Fahrzweck (MZMV)	Nachfrageschicht (KVM-AG)	Methodik
Arbeiten	01_WA Wohnen-Arbeit	Beob. Radanteil + Umverteilung aus Diff. 2015 zu 2021
Keine	02_WBS Wohnen-Bildung Schule	Unverändert, kein E-Bike
Ausbildung, Schule	03_WBU Wohnen-Bildung Uni	Beob. Radanteil + Umverteilung aus Diff. 2015 zu 2021
Einkaufen	04_WEK Wohnen-Einkauf kurz	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Einkaufen	05_WEL Wohnen-Einkauf lang	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Dienstleistungen	06_WN Wohnen-Nutzfahrt	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Keine	07_WBBH Wohnen-Begleiten	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über E-Bike-Mittelwert
Freizeitaktivität	08_WFk Wohnen-Freizeit kurz	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Freizeitaktivität	09_WFL Wohnen-Freizeit lang	Rel. Veränderung 2015 zu 2021
Keine	23_ES Einkauf-Sonstiges	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	25_NS Nutzfahrt-Sonstiges	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	27_SS Freizeit/Sonstiges-Sonstiges/Freizeit	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	28_DECHWA DE Wohnen-CH Arbeit	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	29_CHDEWE CH Wohnen-DE Einkauf	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert
Keine	30_CHDEWF CH Wohnen-DE Freizeit	Vorhandener Radverkehr aufgeteilt über allg. E-Bike-Mittelwert

Vice versa für die Gegenrichtung