ETH zürich

Lehrstuhl für Infrastrukturmanagement

Algorithmusbasierte Entscheidungsunterstützung für die Planung des SBB - Bahnnetzes bis 2100

Szenariobasierte Generierung und Bewertung von Ausbauvarianten

Silvano Fuchs ETH-Nr: 20-929-824
18.07.2025

Prof. Dr. Bryan T. Adey
Arnór Elvarsson

Institut für Bau- und Infrastruktur-management

D BAUG

Danksagung

Ich danke Arnór Elvarsson herzlich für das grosse Vertrauen, die kontinuierliche Unterstützung und das ausgeprägte Engagement während des gesamten Projekts. Durch seine konstruktive Kritik sowie das gemeinsame Hinterfragen wurden mir sowohl die Stärken als auch die Grenzen meiner Arbeit besser bewusst. Seine wertvollen Empfehlungen und aussergewöhnliche Geduld hatten massgeblichen Einfluss auf alle Aspekte dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt zudem Prof. Dr. Bryan Adey für die kompetente Betreuung, die fachliche Anleitung und das tiefgehende Verständnis für das Thema. Sein fundiertes Feedback, insbesondere bei der Kommunikation der Ergebnisse während der Zwischen- und Abschlusspräsentationen, trug wesentlich zum Erfolg der Arbeit bei.

Ich bin beiden Mentoren für ihre Begleitung sehr dankbar. Die Arbeit hat mir geholfen, meine Interessen für meine berufliche Zukunft weiter zu schärfen.

Quelle Titelbild: (Alphacoders 2020)

Inhaltsverzeichnis

1	**Einleitung**	**1**
2	**Literaturrecherche**	**2**
2.1	Überblick	2
2.2	Planungsprozess für Eisenbahninfrastruktur in der Schweiz	2
2.3	Entwicklung Bahnnetz Schweiz bis 2050	4
2.4	Planen mit Unsicherheiten	5
2.4.1	Generell	5
2.4.2	Szenarienbildung	5
2.4.3	Adaptive Planung	6
2.5	Algorithmische Generierung von Infrastruktur	6
2.6	Erkenntnisse	8
3	**Methodik**	**9**
3.1	Überblick	9
3.2	Gesellschaftliche Bedürfnisse für Bahnangebot identifizieren	10
3.3	Generierung von Angebots- und Infrastrukturausbauten	10
3.4	Generierung von Szenarien	12
3.5	Umlegung der Nachfrage auf das Bahnnetz	12
3.6	Bewertung von Ausbauten	13
3.6.1	Überblick	13
3.6.2	Stakeholder	14
3.6.3	Bewertungsfunktion	14
3.7	Darstellen der Ergebnisse	15
4	**Fallstudie**	**16**
4.1	Aufbau Toolbox	16
4.2	Bahnnetz	16
4.3	Räumliche Einbettung des Korridors	19
4.4	Generierung von Angebots- und Infrastrukturausbauten	20
4.4.1	Typen von Ausbauten	20
4.4.2	Linien um eine Station verlängern	22
4.4.3	Verbindung von Korridoren	23
4.4.4	Neue S-Bahn Linien generieren	26
4.4.5	Projektierung Verbindungskurven	28
4.5	Szenariogenerierung	29
4.5.1	Überblick	29
4.5.2	Bevölkerung	30
4.5.3	Modal Split ÖV	32
4.5.4	Durchschnittliche Tagesdistanz	33
4.6	Modellierung Verkehrsnachfrage	34
4.6.1	Berechnung Nachfrage	34
4.6.2	Umlegung der Nachfrage auf das Bahnnetz	35
4.7	Reisezeitberechnung und Wegfindung	37
4.8	Bewertung	38

4.8.1 Stakeholder und ihre Interessen 38
4.8.2 Bewertungsfunktion 40
4.8.3 Baukosten 42
4.8.4 Ungedeckte Unterhaltskosten 43
4.8.5 Ungedeckte Betriebskosten 44
4.8.6 Reisezeitersparnisse 44
4.9 Berechnungszeiten 45

5 Resultate 47
5.1 Modellierte Nachfrage auf dem Bahnnetz 47
5.1.1 Überblick 47
5.1.2 Referenzzustand 2050 47
5.1.3 Nachfrage mit einem Angebotsausbau 49
5.1.4 Vergleich mit realen Daten 52
5.2 Bewertung Geplante Ausbauten (AK2035) 54
5.3 Bewertung generierter Ausbauten 55
5.3.1 Überblick 55
5.3.2 Neue Linien zur Verbindung von Korridoren 56
5.3.3 Linie um eine Station verlängern 62

6 Diskussion 64
6.1 Diskussion der einzelnen Module 64
6.1.1 Generierte Angebots- und Infrastrukturausbauten 64
6.1.2 Szenariengenerierung 64
6.1.3 Nachfragemodellierung und Umlegung 65
6.1.4 Bewertung der Ausbauten 65
6.2 Limitationen und Vereinfachungen 66
6.2.1 Überblick 66
6.2.2 Erforderliche Daten 66
6.2.3 Generierung von Ausbauten 67
6.2.4 Generierung von Szenarien 67
6.2.5 Modellierung und Umlegung der Nachfrage 67
6.2.6 Bewertung der Ausbauten 68
6.3 Anwendung des Unterstützungstools: Perspektiven für das Bahnnetz 2100 68

7 Ausblick 70

8 Fazit 71

Referenzen 72

Appendix 76
A1. Verwendete Datensätze 76
A2. Verwendung von KI-Tools 77

Abkürzungen

AS2035	Ausbauschritt 2035
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
BAV	Bundesamt für Verkehr
BIF	Bahninfrastrukturfonds
CHF	Schweizer Franken
DBO	Direkt betroffene Öffentlichkeit
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
GVM	Gesamtverkehrsmodell
IBO	Indirekt betroffene Öffentlichkeit
ISB	Infrastrukturbetreiber
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell
ÖV	Öffentlicher Verkehr
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
STEP	Strategisches Entwicklungsprogramm
VTTS	Value of travel time savings: Zeitkostenansatz für Reisezeitersparnisse
ZVV	Zürcher Verkehrsverbund

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Überblick über den Planungsprozess von Bahninfrastrukturen in der Schweiz. 3
Abbildung 2 Überblick über die angewandte Methodik sowie der einzelnen Module. 10
Abbildung 3 Die drei Planungskomponenten des Bahnsystems: Infrastruktur, Angebot und Rollmaterial. 11
Abbildung 4: Umlegung der Verkehrsnachfrage auf das Bahnnetz: Links: Zuordnung der Gemeinden zum jeweils nächstgelegenen Bahnhof basierend auf der Luftlinie. Rechts: Bildung von Einzugsgebieten anhand der Erschliessung durch das Busnetz. 13
Abbildung 5 Modulstruktur der Python-basierten Toolbox. 16
Abbildung 6 Heutiges Liniennetz der S-Bahn Zürich im Fallstudiengebiet Dübendorf – Hinwil. 17
Abbildung 7 Bahnnetz der Fallstudie mit eingezeichnetem Perimeter. Das Liniennetz zeigt den Zustand mit dem Ausbauschritt 2035. 18
Abbildung 8 Fallstudienperimeter Dübendorf - Hinwil mit modelliertem Bahnnetz und Verkehrsnachfrage sowie mit generierten Verbindungskurven. 20
Abbildung 9 Generierte Verlängerungen von Linien um eine Station im Korridor Dübendorf – Hinwil. 23
Abbildung 10 Einteilung des Netzes in Korridore und Verknüpfungspunkte zur Identifizierung von fehlenden Direktverbindungen. 24
Abbildung 11 Erklärung Algorithmus zur Identifikation von fehlenden Direktverbindungen von Korridoren. 25
Abbildung 12 Identifizierte fehlende Direktverbindungen für das erweiterte Bahnnetz der Fallstudie. Zentrumsknoten die gleichzeitig auch Grenzknoten sind, sind als Grenzknoten markiert. Dies ist möglich bei überlappenden Verknüpfungsgebieten. 26
Abbildung 13 Erklärung Algorithmus zur Generierung von neuen S-Bahn Linien ausgehend von fehlenden Direktverbindungen (siehe roter Pfeil). 27
Abbildung 14 Projektierte Verbindungskurven als Infrastrukturausbauten zur Ermöglichung neuer Direktverbindungen. 29

Abbildung 15 Generierte Bevölkerungsszenarien für den Bezirk Zürich. Der zentrale Wahrscheinlichkeitsbereich mit 90% der typischsten Werte ist rot eingegrenzt. Die blaue Kurve zeigt eines der 100 erzeugten Szenarios. 31
Abbildung 16 Wachstumsindex der einzelnen Bezirke von 2018 bis 2100 über alle Szenarien hinweg. 32
Abbildung 17 Generierte ÖV Modal-Split Szenarien für die Schweiz. Der zentrale Wahrscheinlichkeitsbereich mit 90% der typischsten Werte ist rot eingegrenzt. Die blaue Kurve zeigt eines der 100 erzeugten Szenarios. 33
Abbildung 18 Generierte Szenarien für die zurückgelegte, mittlere Tagesdistanz pro Person in der Schweiz. Der zentrale Wahrscheinlichkeitsbereich mit 90% der typischsten Werte ist rot eingegrenzt. Die blaue Kurve zeigt eines der 100 erzeugten Szenarios. 34
Abbildung 19 Zuordnung der Verkehrszonen (meist Gemeinden) innerhalb des Kantons Zürich zum nächstgelegenen Bahnhof (Luftlinie) des modellierten Bahnnetzes. 36
Abbildung 20 Graphenbasierte Darstellung des Bahnnetzes zur Modellierung der Reisezeiten aus Sicht der Fahrgäste. 37
Abbildung 21 Umgelegte Reiseströme auf dem Referenznetz 2050. Gefilterte Nachfrage: Dargestellt sind nur Fahrten mit Start- und/oder Zielpunkt im betrachteten Korridor. 48
Abbildung 22 Reiseströme des gesamten Kantons Zürich mit Aussengebieten auf das Bahnnetz umgelegt. 49
Abbildung 23 Liniendiagramm der generierten Linien X2 und X32 mit den erforderlichen Verbindungskurven. 50
Abbildung 24 Veränderung der Reiseströme durch den Angebots- und Infrastrukturausbau der generierten Linie X32 sowie der Verbindungskurve Illnau – Kemptthal (markiert mit rotem Pfeil). Links: gesamte Nachfrage. Rechts: Differenz zum Referenzzustand des Netzes 2050. 51
Abbildung 25 Auswirkungen der Linie X2 und der Verbindungskurve Dübendorf – Dietlikon (roter Pfeil) auf die Reiseströme. Links: gesamte modellierte Nachfrage mit Angebots- und Infrastrukturausbau. Rechts: Differenz zum Referenzzustand des Netzes 2050. 52
Abbildung 26 Vergleich der modellierten mit der effektiv gemessenen Nachfrage im durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) im Fallstudienkorridor. 53
Abbildung 27 Entwicklung der gesamte Reisezeit für die gefilterte Nachfrage mit Start und/oder Ziel im Korridor. Verglichen wird zwischen dem heutigen Netz und dem Referenznetz 2050, welches die Ausbauten des AS2035 beinhaltet. 54
Abbildung 28 Übersicht der Resultate zu den generierten Linien sowie deren Bewertung. 55
Abbildung 29 Linienset 1. Generierte Linien mit dem höchsten Nettonutzen in dieser Arbeit: Links: Linienplan mit Verbindungskurven, welche mit einem roten Pfeil markiert sind. Rechts: Auflistung der Kosten- und Nutzenkomponenten der Ausbauten. Mittelwerte über alle Szenarien. Die Farben der Linien entsprechen den Farben der Reisezeitersparnis-Balken. 57
Abbildung 30 Linienset 1. Generierte Linien mit dem höchsten Nettonutzen in dieser Arbeit: Links: Linienplan. Die Verbindungskurven sind mit einem roten Pfeil markiert. Rechts: Boxplot der Kosten – Nutzen Faktoren von allen 100 Szenarien. Die Füllfarbe der Boxen entspricht der Farben der Linie auf der Karte. 58
Abbildung 31 Linienset 1. Reisezeitersparnisse der Linien mit dem höchsten Nettonutzen. Links die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung und rechts der Boxplot. 59
Abbildung 32 Linienset 2. Weitere sechs generierte Linien. Links: Linienplan mit Verbindungskurven (roter Pfeil). Rechts: Auflistung der Kosten- und Nutzenkomponenten der Ausbauten. Mittelwerte über alle Szenarien. Die Farben der Linien entsprechen den Farben der Reisezeitersparnis-Balken. 60
Abbildung 33 Linienset 3. Kosten und Nutzen von ausgewählten Linien bei der Verwendung der gesamten Nachfrage des Kantons Zürich mit Aussengebieten. Links: Linienplan. Rechts: Balkendiagramm der Kosten und Nutzen 61

Abbildung 34 Linienset 3. Kosten – Nutzen – Faktor von ausgewählten Linien bei der Verwendung der gesamten Nachfrage des Kantons Zürich mit Aussengebieten. Links: Linienplan. Rechts: Boxplot des Kosten – Nutzen – Faktors. 61
Abbildung 35 Zeitliche Verteilung der diskontierten Kosten und Nutzen für die Linie X32 Winterthur - Pfäffikon. Die Baukosten sind aufgrund ihres hohen Wertes nicht massstäblich dargestellt. 62
Abbildung 36 Nutzen und Kosten der Linienverlängerungen. Links Übersichtskarte mit den generierten Verlängerungen. Rechts: Darstellung der einzelnen Kostenkomponenten pro Verlängerung, sortiert nach Nettonutzen. Dargestellt sind die Mittelwerte über alle Szenarien. Es besteht keine farbliche Zuordnung zwischen Linienplan und Balkendiagramm. 63
Abbildung 37 Empfohlene Ausbauvarianten für neue Direktverbindungen zur vertieften Planung. 69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht möglicher Typen von Angebotsausbauten sowie die betroffenen Infrastruktur- und Angebotselemente. 21
Tabelle 2 Mathematische Formulierung des Random-Walk-Modells für die Generierung der Zukunftsszenarien. 30
Tabelle 3 Mathematische Definition der Berechnung der Verkehrsnachfrage zwischen allen Verkehrszonen/ Gemeinden für alle Jahre und Szenarien. 35
Tabelle 4 Definition der relevanten Stakeholder und der zugeordneten Kostenkomponenten. Angepasst von (Papathanasiou u. a. 2019) 39
Tabelle 5 Berücksichtigte Kostenkomponenten der Stakeholder in der Bewertungsfunktion und Begründung für den Einbezug bzw. Ausschluss. 41
Tabelle 6 Mathematische Formulierung der Bewertungsfunktion: Aggregation und Diskontierung der Kostenkomponenten 42
Tabelle 7 Berechnung der Baukosten für eine Infrastrukturentwicklungen. 43
Tabelle 8 Einheitspreise pro Infrastrukturelement auf Basis vergleichbarer Referenzprojekte. 43
Tabelle 9 Berechnung der Unterhaltskosten für Infrastrukturausbauten. 43
Tabelle 10 Berechnung des monetären Nutzens der Reisezeitersparnisse. 45
Tabelle 11 Berechnungslaufzeiten des Tools pro Modul. 46

Masterarbeit in Raumentwicklung und Infrastruktursysteme

Algorithmusbasierte Entscheidungsunterstützung für die Planung des SBB - Bahnnetzes bis 2100

Szenariobasierte Generierung und Bewertung von Ausbauvarianten

Autor Silvano Fuchs
Friesstrasse 46
8050 Zürich

+41 77 460 19 41
silvano_fuchs@bluewin.ch

Betreuung: Prof. Dr. Bryan T. Adey, Professor für Infrastrukturmanagement
Arnor Elvarsson

Juli 25

Zusammenfassung

Eine leistungsfähige Bahninfrastruktur ist die Basis für eine erfolgreiche Mobilitätswende. Die langfristige Planung des Schweizer Bahnnetzes steht jedoch angesichts begrenzter Ressourcen, divergierenderbitte Interessen der Akteure und der hoher Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen vor komplexen Herausforderungen. Diese Masterarbeit begegnet diesen durch die Entwicklung eines datenbasierten Tools zur Entscheidungsunterstützung, welches Planer*innen in frühen Phasen der Bahnnetzplanung durch die algorithmische Generierung und Bewertung von Ausbauvarianten unterstützt.

Aufbauend auf einem Graphen des Netzes des Ausbauschritts 2035 erzeugt ein regelbasierter Algorithmus systematisch neue Angebots- und Infrastrukturausbauten. 100 generierte, explorative Zukunftsszenarien bilden die unsicheren zukünftigen Entwicklungen der Verkehrsnachfrage bis 2100 ab. Eine flächendeckende Modellierung der Verkehrsnachfrage erlaubt die Analyse der Auswirkungen von Ausbauten auf Reisezeiten und Netznutzung. Die Bewertung der Ausbauvarianten erfolgt monetär, auf Basis objektiver Kosten-Nutzen-Kriterien wie Reisezeitersparnissen sowie Bau- und Betriebskosten. Diese Kriterien bilden dabei die Bedürfnisse der einzelnen Stakeholder ab. Anhand einer Fallstudie im Korridor Dübendorf–Hinwil wird die praktische Anwendbarkeit demonstriert:

Die Arbeit zeigt das Potenzial eines solchen Tools: Ausbauten können systematisch in einer Vielzahl generiert werden, wie es Planenden manuell gar nicht möglich wäre. Das Tool liefert ein vorselektiertes Paket bewerteter und priorisierter Varianten, welches als fundierte Grundlage für vertiefte Planungsphasen dienen kann. Das Tool ist zudem auf beliebigen Bahnnetzen einsetzbar. Die explizite Abbildung von Unsicherheiten in den Szenarien erhöht Robustheit der Entscheidungen und stärkt, zusammen mit der objektiven und nachvollziehbaren Bewertung, das Vertrauen der beteiligten Akteure in den Planungsprozess. Durch methodische Verbesserungen in der Generierung und Bewertung sowie einer Ergänzung durch ein grafisches Benutzerinterface würde das vorgestellte Tool künftig die langfristige Bahnplanung wirkungsvoll unterstützen.

Schlüsselwörter

Bahnnetzplanung, Modellierung von Unsicherheiten, Infrastrukturplanung, Szenarioplanung, Algorithmusbasiert, Infrastrukturgenerierung, Entscheidungsunterstützung

Bevorzugte Zitierweise

Fuchs, S. (2025), *Algorithmusbasierte Entscheidungsunterstützung für die Planung des SBB - Bahnnetzes bis 2100*, Masterarbeit, Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement, ETH Zürich, Zürich.

1 Einleitung

Die Bahn spielt eine zentrale Rolle in der Mobilitätswende und beim Erreichen des Netto-Null-Ziels bis 2050, zu welchem sich die Schweiz verpflichtet hat (Bundesamt für Umwelt 2025a). Als energieeffizientes und elektrifiziertes Verkehrsmittel bietet sie die Möglichkeit, den Personen- und Güterverkehr klimafreundlich von der Strasse auf die Schiene zu verlagern – ein entscheidender Hebel, denn der Verkehrssektor war 2023 mit einem Anteil von 33,6 % der grösste Verursacher von CO_2-Emissionen in der Schweiz (Bundesamt für Umwelt 2025b).

Gleichzeitig verändern sich die gesellschaftlichen Bedürfnisse laufend – insbesondere im Bereich der Mobilität. Bevölkerungswachstum, neue Siedlungsstrukturen, technologische Entwicklungen und ein verändertes Mobilitätsverhalten stellen neue Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur. Um den gesellschaftlichen Nutzen des Bahnnetzes auch langfristig sicherzustellen, müssen Infrastruktur und Angebot laufend angepasst und weiterentwickelt werden. Angesichts begrenzter finanzieller Mittel und der geplanten Lebensdauer der Infrastruktur von 75 Jahren erfordert dies eine vorausschauende Planung und sorgfältige Priorisierung – eine anspruchsvolle Aufgabe für die zuständigen Planer*innen (Weidmann 2020).

Die Planung von Bahninfrastruktur ist jedoch mit zahlreichen Herausforderungen verbunden: divergierende, teils widersprüchliche Interessen verschiedener Stakeholder, langwierige und iterative Planungsprozesse sowie erhebliche Unsicherheiten über zukünftige Entwicklungen erschweren fundierte Entscheidungen – insbesondere in den frühen Phasen der Planung (Elvarsson und Adey 2024). Daher ist es zentral, geeignete Instrumente zur Verfügung zu haben, mit denen potenzielle Ausbauen frühzeitig identifiziert und bewertet werden können. Denn Entscheidungen, die früh im Planungsprozess getroffen werden, prägen den weiteren Entwicklungspfad massgeblich.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein daten- und algorithmusbasiertes Tool zu entwickeln, das Planer*innen in frühen Phasen der Bahnnetzplanung bei der Entscheidungsfindung unterstützt, dies anhand der entwickelten Methodik von (Elvarsson und Adey 2024). Damit soll eine fundiertere und breitere Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, um robustere und nachvollziehbarere Planungsergebnisse zu ermöglichen. Im Fokus stehen dabei folgende Forschungsfragen:

1. Wie kann die Qualität und Nachvollziehbarkeit von Planungsergebnissen in den frühen Phasen der Bahnnetzplanung verbessert werden?

2. Wie lassen sich mögliche Ausbauvarianten des Bahnnetzes algorithmusbasiert generieren und bewerten?

3. Wie stark beeinflusst die Unsicherheit der Zukunft die Bewertung von Ausbauvarianten?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde ein Prototyp entwickelt, welcher algorithmusbasiert eine Vielzahl von Angebots- und Infrastrukturausbauten auf Basis des Bahnnetzes 2050 generiert. Die künftigen Entwicklungen und Bedürfnisse der Gesellschaft werden durch 100 generierte, explorative Szenarien abgebildet. Dies ermöglicht es, die Wirkung der Ausbauvarianten unter Einbezug von Unsicherheiten systematisch anhand der Bedürfnisse der Stakeholder im Zeitraum 2050–2100 zu bewerten. Ergänzend werden die Ergebnisse übersichtlich visualisiert. Die Anwendbarkeit der Methodik wird anhand einer Fallstudie im Korridor Dübendorf–Hinwil aufgezeigt; darauf aufbauend werden konkrete Empfehlungen für die vertiefte Planung in diesem Gebiet formuliert.

2 Literaturrecherche

2.1 Überblick

Die in der Einleitung skizzierten Herausforderungen in der Bahnnetzplanung – insbesondere der Umgang mit Unsicherheiten, die Vielzahl involvierter Akteure sowie die begrenzten Ressourcen – verdeutlichen die Notwendigkeit einer fundierten methodischen Grundlage für frühzeitige, robuste Entscheidungen. Um ein daten- und algorithmusbasiertes Entscheidungsinstrument sinnvoll entwickeln zu können, bedarf es zunächst eines vertieften Verständnisses der bestehenden Planungsprozesse und deren Grenzen – sowie möglicher Weiterentwicklungen.

Dieses Kapitel fasst deshalb den aktuellen Wissensstand in den für diese Arbeit zentralen Themenfeldern zusammen. Im Fokus stehen dabei sowohl institutionelle als auch methodische Aspekte der Bahninfrastrukturplanung in der Schweiz sowie grundlegende Ansätze aus der Forschung zur Planung unter Unsicherheit und algorithmischen Variantenbildung.

Abschnitt 2.2 erläutert den institutionellen Planungsprozess und die Rollen der beteiligten Akteure. In 2.3 wird die langfristige Entwicklung des Bahnnetzes bis 2050 skizziert. Abschnitt 2.4 behandelt den Umgang mit Unsicherheiten, insbesondere durch Szenarienbildung und adaptive Planung. Anschliessend wird in 2.5 die algorithmische Generierung von Infrastrukturvarianten als neuer Ansatz zur Variantenbildung vorgestellt. Die wichtigsten Erkenntnisse werden in 2.6 zusammengefasst.

2.2 Planungsprozess für Eisenbahninfrastruktur in der Schweiz

Bahninfrastrukturen zeichnen sich durch sehr hohe Realisierungs- und darauf folgende Instandhaltungskosten aus. Die Realisierungsdauer von Netzerweiterungen vom Beginn der Planung über den Bau bis hin zur Inbetriebnahme kann gut 25 Jahre oder mehr in Anspruch nehmen. Gleichzeitig beträgt die geplante Lebensdauer solcher Infrastrukturen auch 75 Jahre oder länger. Bahninfrastrukturprojekte benötigen daher eine besonders vorausschauende, abgestimmte und robuste Planung, die sowohl technische, gesellschaftliche als auch politische Anforderungen integriert (Weidmann 2020).

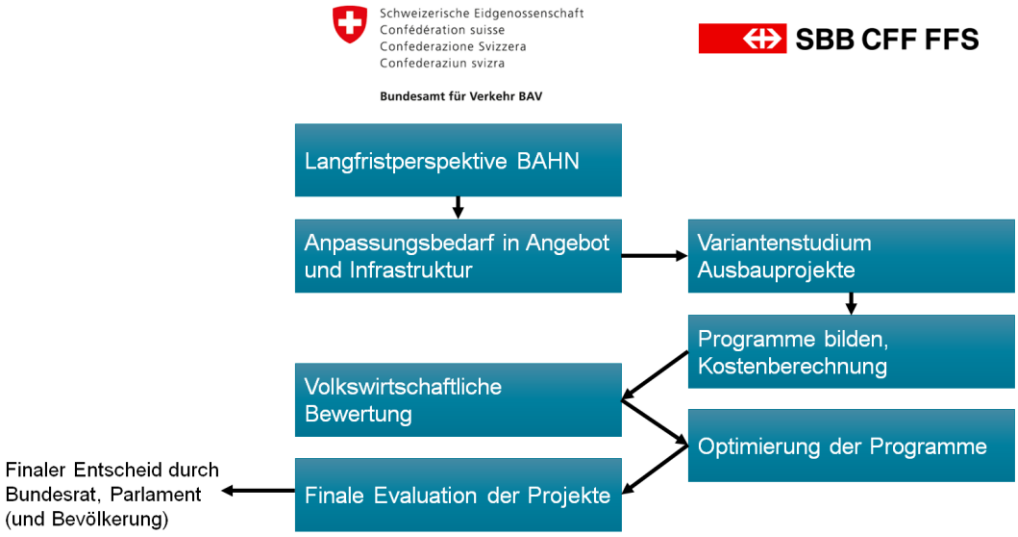
Die Planung der Schweizer Bahninfrastruktur erfolgt stufenweise über verschiedene Detailierungsgrade und Zeithorizonte hinweg. Der Prozess ist dabei von einem starken iterativen Charakter und einer Vielzahl von mitwirkenden Akteuren geprägt. Je nach Planungsstufe sind unterschiedliche Akteure beteiligt. Die Akteure lassen sich in folgende Kategorien einteilen (Elvarsson und Adey 2024):

- gestaltende Akteure (z. B. Amt für Raumentwicklung (ARE), Bundesamt für Verkehr (BAV), Kantone)
- genehmigende Instanzen (z. B. Parlamente, Stimmbevölkerung)
- mitwirkende Organisationen (z. B. SBB, regionale Infrastrukturbetreiber (ISB)
- kontrollierende Stakeholder (z. B. Nutzer: innen, Aufsichtsbehörden (ARE, BAV), Umweltverbände)

Im Folgenden wird der Planungsprozess für Bahninfrastrukturen im Kanton Zürich unter Einbezug der relevanten Akteure erläutert. Einen Überblick dazu bietet zudem Abbildung 1.

Das ARE startet den Prozess mit der Entwicklung des Sachplan Verkehr. Ergänzend dazu hält das BAV die langfristigen Anforderungen an das Bahnangebot in Bahnstrategien fest – derzeit konkretisiert in der Perspektive BAHN 2050 (Bundesamt für Verkehr 2025c). Diese Strategien basieren auf den Ergebnissen verschiedener Studien, welche auch Verkehrsmodelle einsetzen: Zum einen das nationale Personenverkehrsmodell (NPVM), ein makroskopisches Verkehrsmodell, welches die zukünftige Verkehrsentwicklung verkehrsträgerübergreifend aufzeigt (Bundesamt für Raumentwicklung ARE 2020). Ein weiteres Instrument ist SIMBA MOBi, ein agentenbasiertes, mikroskopisches Modell, von der SBB für die Entscheidungsunterstützung in Angebot und Infrastruktur verwendet wird (Scherr u. a. 2020). Allerdings sind diese Modelle nicht in der Lage, eigenständig Ausbauszenarien zu generieren oder diese hinsichtlich umfassender Kostenkomponenten zu bewerten. Ebenso berücksichtigen sie die Unsicherheiten zukünftiger Entwicklungen nur unzureichend.

Zur Erfüllung der künftigen Anforderungen entwickelt die SBB in Zusammenarbeit mit anderen ÖV-Betreibern, Kantonen sowie dem BAV regionale Netzentwicklungspläne und erstellt Angebotskonzepte für Fern- und Güterverkehr, während die Kantone als zukünftige Besteller den regionalen Personenverkehr definieren (Elvarsson und Adey 2024). Diese Konzepte werden auf nationale Ziele abgestimmt und vom BAV validiert. Darauf aufbauend wird vom BAV geprüft, ob die bestehende Infrastruktur ausreicht, um das geplante Angebot zu produzieren. Das BAV beauftragt anschliessend die SBB (oder andere ISB), Engpässe zu identifizieren und Ausbauvorschläge zu erarbeiten, aus denen das BAV eine aktualisierte Projektliste erstellt. In der Projektentwicklung führt die SBB Machbarkeitsstudien durch, bündelt Projekte zu Modulen (Ausbauschritte) und erstellt Kostenschätzungen. Ergänzend dazu wird eine iterative Optimierung der Module durchgeführt. Das BAV bewertet die Projekte unter sozioökonomischen Gesichtspunkten und priorisiert sie für die Einreichung an den Bundesrat. Die finale Entscheidung über Finanzierung und Umsetzung trifft das Bundesparlament im Rahmen des strategischen Entwicklungsprogramms (STEP). Dort wird entschieden, welche Projekte in die jeweiligen Ausbauschritte aufgenommen und durch den Bahninfrastrukturfond (BIF) finanziert werden.



Quelle: (Elvarsson und Adey 2024). Logos: (Systemaufgaben Kundeninformation 2025).

Abbildung 1 Überblick über den Planungsprozess von Bahninfrastrukturen in der Schweiz.

Der beschriebene Planungsprozess ist mit einigen komplexen Herausforderungen verbunden. Die föderalistischen Regierungsstrukturen und das ausgeprägte Mitsprachrecht führt zu einer Vielzahl beteiligter Akteure mit unterschiedlichen Hintergründen und Zielen. Dies erschwert die Konsensbildung und erhöht die Gefahr von Kommunikationsdefizite, die wiederum Misstrauen schaffen und die gesellschaftliche Akzeptanz von Ausbauprojekten verringern können. Häufig stehen sich die Anforderungen der beteiligten Interessengruppen gegenüber – teils sogar zwischen Planungsinstitutionen auf Bundes- und Kantonsebene. Zudem besteht ein Mangel an transparenten Entscheidungsgrundlagen, um die Zielkonflikte objektiv abwägen. Dies gefährdet die Wirksamkeit der Planung und die Effektivität der beschlossenen Ausbauprojekte (Elvarsson und Adey 2024). Zusätzlich erhöht sich durch den iterativen Charakter der Planungsprozesse die Dauer der Verfahren und damit auch ihre Kosten. Dies kann so weit führen, dass Infrastrukturausbauten zu einem Zeitpunkt beschlossen werden, an dem die zugrunde liegenden Bewertungsgrundlagen bereits veraltet sind und die künftigen Mobilitätsbedürfnisse nicht mehr adäquat abbilden. Insbesondere langfristige Projekte sind anfällig für solche Fehlannahmen über zukünftige Rahmenbedingungen. Dies kann zur Folge haben, dass Infrastrukturen entweder über- oder unterdimensioniert sind oder zu einem zeitlich ungünstigen Moment realisiert werden – mit entsprechend negativen Auswirkungen auf Ressourcenverbrauch und Nutzen (Elvarsson und Adey 2024).

Diese strukturellen und prozessualen Herausforderungen machen deutlich, dass nicht nur die reine Dauer eines Planungsverfahrens entscheidend ist. Vielmehr stellt sich die Frage, wie schnell und wirksam das Planungssystem in der Lage ist, auf gesellschaftliche Bedarfe zu reagieren – also von der Bedarfserkennung bis zur Bereitstellung der entsprechenden Infrastruktur. Diese Fähigkeit bezeichnen (Elvarsson u. a. 2025) als Reaktionsfähigkeit der Planungsprozesse und führen sie als neues Konzept in die Infrastrukturplanung ein.

Zur Verbesserung der Planungsprozesse und deren Ergebnissen sowie als Antwort auf die Herausforderungen wurden von (Elvarsson und Adey 2024) mehrere Verbesserungsmöglichkeiten formuliert: Neben der Überprüfung von Kosten und Aufwand der einzelnen Planungsschritte sowie der Schaffung verbesserter Koordinations- und Kommunikationsstrukturen wurden auch Möglichkeiten für die Planungsmethodik vorgeschlagen. So können datenbasierte Entscheidungswerkzeuge, wie beispielsweise netzweite Nutzenanalysen oder Szenarioanalysen dazu beitragen, fundierte und für alle nachvollziehbare Entscheidungen zu treffen. Ausserdem sollte die Unsicherheit der Zukunft in den Entscheidungswerkzeugen stärker berücksichtigt und den Akteuren wirkungsvoller kommuniziert werden, um detailliertere Entscheidungsgrundlagen zu schaffen.

2.3 Entwicklung Bahnnetz Schweiz bis 2050

Ein Grossteil der aktuell geplanten Bahnausbauten in der Schweiz sind im Ausbauschritt 2035 (AS 2035) enthalten. Im Raum Zürich umfasst dieser unter anderem den Bau eines vierten Gleises in Stadelhofen sowie das Projekt Mehrspur mit dem Brüttener Tunnel zwischen Zürich und Winterthur und der Erweiterung mehrerer Bahnhöfe. Der Fokus liegt insgesamt weniger auf schnelleren Verbindungen, sondern auf der Kapazitätserweiterung und der partiellen Einführung eines 15-Minuten-Takts auf den nachfragestärksten Relationen (Bundesamt für Verkehr 2025a). Da der AS 2035 rund 14 Milliarden Franken teurer wird als vorgesehen und der Ausbau der Nationalstrassen zuletzt an der Urne scheiterte, plant der Bund im Rahmen des Programms Verkehr '45 eine gemeinsame Priorisierung von Bahn- und Strassenprojekten (News Service Bund 2025). Neben dem AS 2035 bestehen auch langfristiger angelegte Projekte wie der Durchgangsbahnhof Luzern oder der Ausbau des Knotens Basel, für die bislang jedoch keine gesicherte Finanzierung besteht (Bundesamt für Verkehr 2024; Kanton Luzern 2025).

Die Perspektive BAHN 2050 bildet den strategischen Rahmen für den langfristigen Ausbau des Schienennetzes (Bundesamt für Verkehr 2025c) über den AS 2035 hinaus. Dabei steht die Erschliessung kurzer und mittlerer Distanzen im Vordergrund, insbesondere in den Agglomerationen und zwischen regionalen Zentren. Neue Tangential- und Durchmesserlinien sowie der gezielte Ausbau von S-Bahn-Systemen sollen die Kapazität im Nahverkehr erhöhen. Der Fernverkehr wird dort verbessert, wo die Bahn gegenüber der Strasse noch nicht wettbewerbsfähig ist – etwa durch gezielte Fahrzeitverkürzungen oder zusätzliche Direktverbindungen. Für den Güterverkehr ist der Ausbau intermodaler Umschlagsplattformen entlang der Hauptachsen geplant, ebenso wie neue City-Logistik-Anlagen in urbanen Räumen.

Das Zielbild Mobilität der SBB konkretisiert diese Ansätze mit Fokus auf die betriebliche Optimierung des Netzes (Renninger 2024). Dazu zählen dichtere Takte (15-Minuten-Angebot), vereinfachte Knotenstrukturen, reduzierte Fahrplankonflikte und ein stärkerer Einsatz standardisierter Infrastruktur. Bestehende Gleisanlagen sollen durch Anpassungen im Layout und der Haltepolitik effizienter genutzt werden. Neue Kapazitäten sollen primär durch Umbauten im Netz entstehen, grossflächige Neubauten bleiben die Ausnahme. Die Netzplanung orientiert sich damit stärker an betrieblicher Machbarkeit, Umsetzungsgeschwindigkeit und minimalem Flächenverbrauch.

2.4 Planen mit Unsicherheiten

2.4.1 Generell

Die Planung von Verkehrsinfrastrukturen stellt eine besondere Herausforderung dar, da sie mit einer langen Lebensdauer sowie schwer vorhersehbaren technologischen Entwicklungen, gesellschaftlichen Veränderungen und den Folgen des Klimawandels konfrontiert ist. Das bedeutet, dass die Infrastruktur ihre Leistung überwiegend in einer Zukunft erbringen muss, die zum Zeitpunkt der Planung nur eingeschränkt prognostizierbar ist. Um die geplante Infrastruktur möglichst gut auf die zukünftigen Anforderungen auszurichten, gibt es mehrere Ansätze. Mittels Szenarienbildung wird versucht, mögliche zukünftige Entwicklungen möglichst präzise abzuschätzen, um die geplante Infrastruktur bestmöglich darauf auszurichten (Maier u. a. 2016). Bei der adaptiven Planung ist es möglich, die laufende Planungen flexibel an neue Erkenntnisse anzupassen. Im folgenden Text werden die Möglichkeiten dieser Methoden genauer erläutert.

2.4.2 Szenarienbildung

Um fundierte Entscheidungen in der Infrastrukturplanung zu treffen, werden Szenarien entwickelt, die mögliche Entwicklungen der relevanten Umweltfaktoren (aus Sicht der Infrastruktur) bis zur Inbetriebnahme eines Projekts und darüber hinaus über den gesamten Nutzungszeitraum hinweg beschreiben (Maier u. a. 2016). Diese Szenarien dienen dazu, Planungsentscheidungen besser auf die Zukunft auszurichten oder robuster gegenüber zukünftigen Unsicherheiten zu machen. Es existieren unterschiedliche methodische Ansätze zur Szenarienbildung, die sich in Zielsetzung, Struktur und Umgang mit Unsicherheit unterscheiden. Im Folgenden werden die drei häufigsten Szenariotechniken erläutert:

In prognosebasierten Szenarien wird versucht, die wahrscheinlichste Zukunft auf Basis vorhandener Daten und Modelle abzuschätzen. Diese Szenarien stützen sich auf historische Trends, Statistiken und Simulationen, z. B. zur Bevölkerungsentwicklung oder Verkehrsnachfrage. Diese Szenarien sind einfach kommunizierbar und werden oft in frühen Planungsphasen eingesetzt, wie beispielsweise in der Perspektive BAHN 2050 (Bundesamt für Verkehr 2025c). Allerdings weisen prognosebasierte Szenarien auch erhebliche Limitationen auf: So basieren sie hauptsächlich auf der Annahme, dass sich bestehende Entwicklungen in ähnlicher Weise fortsetzen werden (Lempert u. a. 2020). Dies kann

zu systematischen Fehleinschätzungen führen – insbesondere dann, wenn es zu einem Paradigmenwechseln kommt, wie beispielsweise die angestrebte Klimaneutralität bis 2050 in der Schweiz (Flyvbjerg u. a. 2005; Bundesamt für Umwelt 2025a).

Explorative Szenarien gehen von der Gegenwart aus und beschreiben verschiedene plausible Entwicklungen in der Zukunft. Sie basieren auf der Annahme, dass die Zukunft von einer Vielzahl schwer vorhersehbarer Faktoren beeinflusst wird – beispielsweise demografische Veränderungen, technologische Innovationen oder geänderte politische Rahmenbedingungen (Maier u. a. 2016). Diese Annahme wird in der Forschung auch als tiefe Unsicherheit «deep uncertainty» bezeichnet und bildet eine Motivation zur explorativen Szenarienbildung (Stanton und Roelich 2021). Ziel ist es nicht, eine genaue Vorhersage zu treffen, sondern ein Spektrum möglicher Zukünfte zu entwickeln, innerhalb dessen sich Entwicklungen realistischerweise bewegen könnten. Diese Szenarien helfen, die Bandbreite der Unsicherheit sichtbar zu machen und Entscheidungsprozesse darauf auszurichten.

Normative Szenarien beschreiben dagegen eine gewünschte Zukunft, die etwa durch gesellschaftliche, politische oder ökosystembezogene Ziele definiert ist, beispielsweise die Klimaneutralität der Schweiz bis 2050 (Bundesamt für Umwelt 2025a). Dies resultiert in Szenarien, welche entweder das bestehende System anpassen (v.a. qualitativer Natur) oder eine grundlegenden Neugestaltung vornehmen (Maier u. a. 2016). Bei letzterem wird vom Zielzustand aus rückwärts geplant, um zu bestimmen, welche Massnahmen und Entwicklungen notwendig sind, um die gewünschte Zukunft zu erreichen. Solche Transformationsszenarien beziehen sich in der Regel auf einen Zeithorizont von 25 bis 50 Jahren. Diese Methode eignet sich besonders für strategische Zielsetzungen und politische Visionen.

2.4.3 Adaptive Planung

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, können sich die Planungsprozesse für die Bahninfrastruktur gerne über 25 Jahre oder mehr erstrecken. Im Kontext einer unsicheren Zukunft besteht hier die Gefahr, dass Infrastrukturen gebaut werden, welche gar nicht mehr den aktuellen Bedürfnissen der Gesellschaft entsprechen (Elvarsson und Adey 2024).

Die adaptive Planung begegnet dieser Problematik, indem sie systematisch mit Unsicherheit in langfristigen Planungs- und Erstellungsprozessen umgeht: Anstatt sich auf ein fixes Zukunftsszenario zu stützen werden mehrere mögliche Zukünfte berücksichtigt (Haasnoot u. a. 2013). Zusätzlich werden auch mehrere mögliche Handlungsoptionen ausgearbeitet, welche jeweils für andere Zukünfte ausgerichtet sind. Während des Planungsprozesses ist es dann noch möglich, zwischen den Handlungsoptionen für die geplante Infrastruktur zu wählen. Ein zentrales Element ist dabei die kontinuierliche Beobachtung von Variablen, auf die der Nettonutzen besonders sensibel reagiert. Dadurch können frühzeitig Abweichungen erkannt und entsprechende Anpassungen vorgenommen werden. Dieser Ansatz stellt sicher, dass die geplante Infrastruktur auch unter sich verändernden Rahmenbedingungen funktionsfähig bleibt. Gerade bei langlebigen und kapitalintensiven Projekten ist der Nutzen einer adaptiven Planung besonders hoch, da sie dazu beiträgt, die Infrastruktur möglichst passgenau auf die tatsächlichen künftigen Bedürfnisse auszurichten.

2.5 Algorithmische Generierung von Infrastruktur

In den heutigen Planungsprozessen für Verkehrsinfrastruktur werden Ausbauvarianten noch grösstenteils manuell entwickelt, wie auch bei der Bahninfrastruktur (siehe Kapitel 2.2). Alternativ können mögliche Ausbauschritte jedoch auch algorithmisch generiert werden: Dabei werden etwa neue Knoten oder Verbindungen mithilfe regel- oder zufallsbasierter Methoden erzeugt, dies anfänglich nur mit begrenzter Rücksicht auf die Machbarkeit. Dieser bewusst «naive» Zugang hat

nicht das Ziel, direkt umsetzbare Projekte zu liefern. Stattdessen geht es darum, viele mögliche Varianten systematisch zu erzeugen. Diese lassen sich im nächsten Schritt bewerten, filtern und priorisieren. Auf diese Weise entstehen alternative Lösungsvarianten, die in klassischen Planungsverfahren unberücksichtigt bleiben – etwa aus Kapazitätsgründen oder durch implizite Annahmen, welche den Lösungsraum, also die Gesamtmenge möglicher Ausbauvarianten, von Anfang an begrenzen würden. Die algorithmische Generierung wird so zu einem strategischen Werkzeug in frühen Planungsphasen.

In den letzten Jahren wurde die algorithmische Generierung von Infrastrukturen zunehmend erforscht und weiterentwickelt. (Szell u. a. 2022) zeigen beispielhaft, wie urbane Fahrradnetze automatisiert aus wenigen Keimpunkten entlang des bestehenden Strassennetzes generiert werden können – basierend auf verschiedenen topologischen Wachstumskriterien.

(Hackl und Adey 2019) präsentieren ein Modell zur generativen Erzeugung mehrschichtiger Infrastrukturnetze, welche die räumlichen Abhängigkeiten beachten. Dieses wurde zuvor mit Geodaten von realen Netzen in der Schweiz kalibriert. Mithilfe von markovschen Punktprozessen und hybriden Verbindungsmethoden lassen sich realitätsnahe Netzwerke generativ erzeugen, wie in diesem Fall für Strassen- und Stromnetze.

Im Bereich der Bahninfrastruktur analysieren (Guo u. a. 2022; Hu u. a. 2023) die Entstehung von Hochgeschwindigkeitsbahnnetzen in China auf einer makroskopischen Ebene und trainieren ein generatives Netzwerkmodell mit Parametern wie Bevölkerungsdichte, Wirtschaftsproduktion und Entfernung. Dieses Modell konnte die tatsächliche Entwicklung des Hochgeschwindigkeitsnetzes mit einer hohen Genauigkeit nachbilden. (Grolle u. a. 2024) erweitern diesen Ansatz auf europäische Ebene und generieren mithilfe heuristischer Optimierung komplette Hochgeschwindigkeitsnetze mit möglichen Linienplänen und Taktungen unter Einbezug konkurrierender Verkehrsträger. Dies jedoch auch auf einer makroskopischen Ebene. (Elvarsson u. a. 2024) schliesslich kombinieren generative Methoden auf mikroskopischer Ebene mit explorativer Szenarienanalyse (siehe Kapitel 2.4.2). Sie erzeugen algorithmisch neue Autobahnanschlüsse und bewerten diese mithilfe eines Modells hinsichtlich Reisezeit, Kosten und Umweltwirkungen – und das über eine Vielzahl möglicher Zukunftsszenarien, welche auf Monte-Carlo-Simulationen basieren. (Röthlisberger 2024) überträgt den Ansatz von (Elvarsson u. a. 2024) auf Bahninfrastrukturen, beschränkt sich dabei jedoch auf kleinräumige Infrastruktur- oder Liniennetzanpassungen.

Während sich die genannten Arbeiten im mikroskopischen Bereich primär auf die Generierung und Bewertung einzelner Infrastrukturerweiterungen fokussieren, stellt sich im Anschluss die Frage, wie aus der Vielzahl an erzeugten Optionen jene ausgewählt und kombiniert werden können, die im Gesamtnetz den grössten Nutzen hervorbringen. Das multikriterielle Entscheidungsmodell von (Pamucar u. a. 2022) bietet dafür einen Ansatz. Es erlaubt die Bewertung und Priorisierung vieler potenzieller Infrastrukturprojekte – auch bei unsicheren Daten und unter Einbezug von Expertenmeinungen. Das multiperiodische Netzwerkdesign-Modell von (Alireza Seyedvakili u. a. 2020) geht noch einen Schritt weiter: Es ermöglicht nicht nur die Auswahl geeigneter Projekte, sondern auch deren zeitlich abgestimmte Umsetzung über mehrere Planungszeiträume hinweg. Dabei berücksichtigt das Modell Budgetgrenzen, technische Kapazitäten und die Entwicklung der Nachfrage. So können Projekte so kombiniert werden, dass sie gemeinsam eine möglichst grosse Wirkung entfalten.

2.6 Erkenntnisse

Die Planung von Bahninfrastrukturprojekten in der Schweiz ist mit strukturellen und methodischen Herausforderungen verbunden. Im Zentrum steht die Reaktionsfähigkeit des gesamten Planungsprozesses, d.h. wie schnell auf geänderte gesellschaftliche Bedürfnisse mit der Bereitstellung der nötigen Infrastruktur reagiert werden kann. Diese Reaktionsfähigkeit wird durch die tiefe Unsicherheit über zukünftige Rahmenbedingungen stark eingeschränkt. Der breiten Spannweite möglicher Zukünfte wird häufig nicht ausreichend Rechnung getragen, da in der Praxis meist nur wenige Referenzszenarien berücksichtigt werden. Dies verringert die Verlässlichkeit der Entscheidungsgrundlagen und kann dazu führen, dass Akteure den Planungsergebnissen ihre Zustimmung verweigern (Eliasson 2025). Hinzu kommt die Vielzahl beteiligter Akteure mit teils divergierenden Interessen (Elvarsson und Adey 2024).

Generative Methoden zur Erzeugung von Infrastruktur und dessen Bewertung anhand explorativer Szenarienbildung, wie sie (F. Marggi u. a. 2024) im Bereich der Strasseninfrastruktur zeigen, können diese Reaktionsfähigkeit erhöhen. Sie schaffen objektive Entscheidungsgrundlagen, die robuste Entscheidungen ermöglichen und damit das Vertrauen der Akteure sowie häufig auch die Effizienz des Planungsprozesses stärken. Für die Bahn existiert mit (Röthlisberger 2024) ein erster Ansatz, der im Bezug auf Nutzenberechnung, Szenarienbildung und Infrastrukturgenerierung noch weiterentwickelt werden kann.

3 Methodik

3.1 Überblick

Die vorgestellte Methodik ermöglicht durch die algorithmische Generierung einer Vielzahl möglicher Ausbauvarianten eine systematische und flächendeckende Untersuchung des Lösungsraumes möglicher Varianten in einem Umfang, wie es einer Planer*in mit heutigen Methoden und zeitlichen Ressourcen nicht möglich ist. Die potenziellen Entwicklungen basieren auf dem bestehenden Netz und werden in dieses integriert. Anschliessend erfolgt eine Bewertung der Varianten über eine Vielzahl von generierten, explorativen Umweltszenarien hinweg – insbesondere hinsichtlich der Entwicklung von Bevölkerung, Arbeitsplätze sowie dem Mobilitätsverhalten. Dadurch können Unsicherheiten in der zukünftigen Umweltentwicklung explizit berücksichtigt werden. Umwelt ist in diesem Kontext ausserdem nicht im ökologischen Sinne gemeint, sondern beschreibt die relevanten Eigenschaften der kontinuierlichen Umgebung, welche die Infrastruktur umgibt.

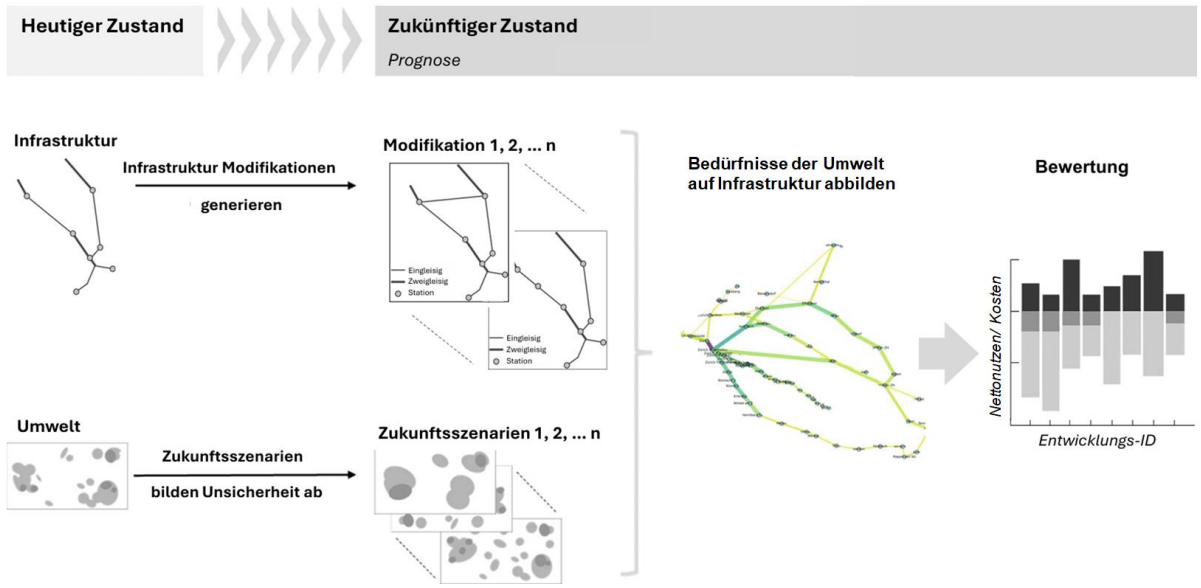
Die Grundlage für die vorgestellte Methodik bilden die vorausgehenden Arbeiten von (F. Marggi u. a. 2024) sowie (Röthlisberger 2024), dessen Ansätze für diese Arbeit weiterentwickelt wurden. Die Methodik umfasst folgende fünf Module:

1. Mobilitätsbedürfnisse der Umwelt der Bahninfrastruktur modellieren (Bevölkerung, Mobilitätsverhalten, …)
2. Generierung möglicher Angebots- und Infrastrukturentwicklungen
3. Erstellung einer Vielzahl von Zukunftsszenarien zur Beschreibung der zukünftigen Entwicklung der Umwelt
4. Mobilitätsnachfrage auf das Angebot umlegen
5. Szenarienübergreifende Bewertung von Nutzen und Kosten der Entwicklungsoptionen

Abbildung 2 stellt diese Module und ihr Zusammenwirken dar. Die Methodik operiert entlang dreier Dimensionen, einer zeitlichen und einer räumlichen. Die inhaltliche Dimension ist durch die Eisenbahn als Transportsystem bereits definiert. Die zeitliche Dimension umfasst die Veränderung von Infrastruktursystem und Umwelt zwischen verschiedenen Zuständen. Die räumliche Dimension beschreibt die Bestandteile des zu modellierenden physischen Raums. Dieser besteht aus der Infrastruktur und ihrer Umwelt, die jeweils getrennt betrachtet und modelliert werden müssen. Das Infrastruktursystem umfasst alle Verbindungen, Knoten und Zugangspunkte. Die Umwelt umfasst in dieser Arbeit alle Faktoren des kontinuierlichen Untersuchungsgebiet, in welches das Infrastruktursystem eingebettet ist: Dazu zählen beispielsweise Bevölkerungsverteilung, Landnutzung oder auch das Mobilitätsverhalten und die Bedürfnisse der Gesellschaft (F. Marggi u. a. 2024).

Jedes Modul arbeitet unterschiedlich entlang der beschriebenen Dimensionen: Die Generierung von Infrastruktur sowie die Erstellung der Szenarien prognostiziert und modelliert die zukünftigen, zeitlichen Zustände dieser Komponenten. Das Umlegen der Mobilitätsnachfrage auf die Infrastruktur legt fest, wie die kontinuierliche Umwelt mit den diskreten Zugangspunkten des Infrastruktursystem räumlich verknüpft wird.

Die nachfolgenden Abschnitte erläutern die Funktionsweise und Inhalte der einzelnen Module im Detail. Die Anwendung der Methodik im Rahmen einer Fallstudie, inklusive der verwendeten Daten und getroffenen Annahmen, wird in Kapitel 4 beschrieben.



Quelle: Adaptiert von (F. M. Marggi 2024)

Abbildung 2 Überblick über die angewandte Methodik sowie der einzelnen Module.

3.2 Gesellschaftliche Bedürfnisse für Bahnangebot identifizieren

Im ersten Modul werden die gesellschaftlichen Mobilitätsbedürfnisse als Grundlage für den möglichen Ausbau der Bahninfrastruktur identifiziert. Um zu verstehen, wie diese Bedürfnisse mit dem jetzigen Verkehrssystem gedeckt werden, wird das Mobilitätsverhalten mittels Quell-Ziel-Matrizen erfasst. Ergänzend zeigen Modal-Split-Anteile, wie attraktiv die Bahn oder generell der öffentliche Verkehr im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern auf den verschiedenen Relationen ist. Ziel ist die räumliche Abbildung des Bedarfs an Bahnangebot, um die Mobilitätsbedürfnisse durch Entwicklungen angemessen bedienen zu können. Werden Bedürfnisse nur mangelhaft vom heutigen Bahnsystem erfüllt, bilden diese einen potenziellen Ausgangspunkt für die Definition eines spezifischen Ausbautyps, der diese Defizite behebt. Dieser Ausbautyp kann anschliessend in nächsten Schritten für die algorithmische Generierung von Ausbauvarianten herangezogen werden.

3.3 Generierung von Angebots- und Infrastrukturausbauten

Im zweiten Schritt wird die zukünftige Infrastruktur durch die systematische Generierung möglicher Angebots- und Infrastrukturentwicklungen hergeleitet. Ausgangspunkt bildet das bestehende Netz, welches als Grundlage für die Entwicklung einer Vielzahl an Varianten dient. In diesem Schritt wird auch speziell auf die Quantität und Vielseitigkeit der generierten Ausbauten gesetzt, um alle

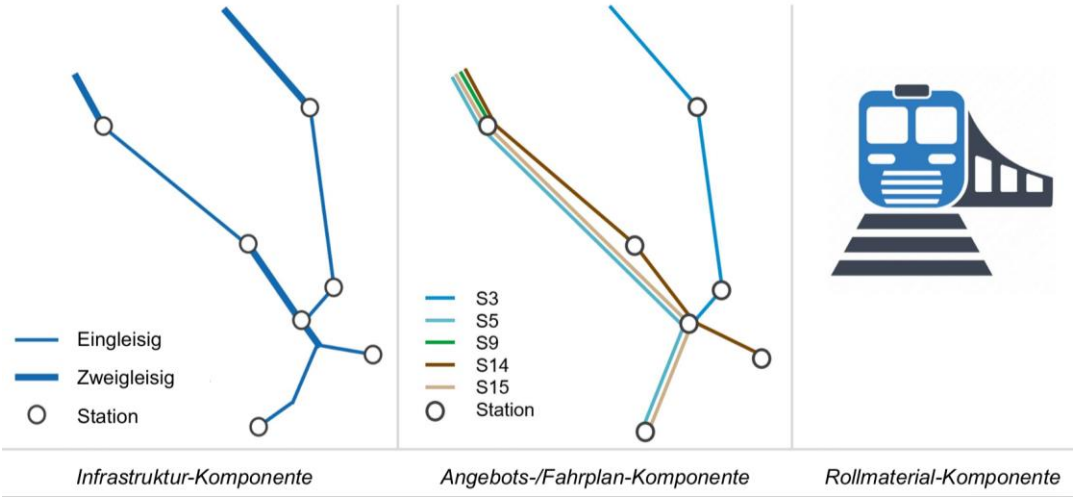
Möglichkeiten für Ausbauten bereits in einer frühen Planungsphase systematisch abzudecken und der Planer*in ein vollständiges Bild über denkbare Ausbauten zu geben.

Grundsätzlich muss bei der Planung von Eisenbahninfrastruktur beachtet werden, dass diese nicht zwangsläufig das tatsächliche Mobilitätsangebot für den Endnutzer widerspiegelt. Das Angebot wird durch die Linien (z.B. S - Bahnen) und deren Fahrplänen bestimmt, welche auf der Infrastruktur operieren. Schlussendlich bildet die Infrastruktur jedoch zusammen mit dem Rollmaterial die Rahmenbedingungen für ein mögliches Mobilitätsangebot auf der Schiene, welches zusammen von Bund, Kanton und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) bestimmt wird (Elvarsson und Adey 2024). Dieser Zusammenhang muss bei der Generierung von Infrastrukturoptionen besonders berücksichtigt werden. Er unterscheidet auch den schienengebundenen ÖV grundlegend vom motorisierten Individualverkehr (MIV), bei dem das Fahrzeug vom Nutzer selbst gestellt wird und die Infrastruktur das Angebot unmittelbar bestimmt. Daher werden für den schienengebundenen ÖV auch die folgenden drei Planungskomponenten definiert (siehe auch Abbildung 3):

- **Infrastruktur:** Physische Komponente des Bahnnetzes, bestehend aus Bahnhöfen als Zugangspunkte zum System und den Strecken sowie Verzweigungen, welche diese verbinden.

- **Angebot /Fahrplan:** Linienführungen, Haltemustern und Taktfrequenzen. Bestimmt schlussendlich das Mobilitätsangebot für den Endnutzer.

- **Rollmaterial:** Fahrzeuge, in welchem Personen oder Güter im Eisenbahnnetz befördert werden.



Quelle: Adaptiert von (Röthlisberger 2024)

Abbildung 3 Die drei Planungskomponenten des Bahnsystems: Infrastruktur, Angebot und Rollmaterial.

Die Entwicklung der Ausbautypen folgt einem angebotsorientierten Ansatz: Zunächst wird definiert, welches Angebotskonzept generiert werden soll; darauf aufbauend werden die dafür erforderlichen Infrastrukturerweiterungen abgeleitet. Ausgangspunkt für einen möglichen Erweiterungstyp können Schwachstellen im aktuellen Bahnangebot sein, beispielsweise Umsteigeverbindungen, die zu verlängerten Reisezeiten und Komforteinbussen führen. Solche Mängel werden als generisches

Problem formuliert, welches auf eine Vielzahl von Situationen im Netz zutrifft. Als Antwort darauf kann systematisch eine Angebotsverbesserungen entwickelt werden, aus welcher sich in einem zweiten Schritt die notwendigen Infrastrukturanpassungen ergeben.

In dieser Arbeit wird die Abstimmung zwischen Rollmaterial und Angebotsausbau vernachlässigt. Der Grund dafür liegt darin, dass dessen Einfluss auf mögliche Veränderung des Angebots und des Fahrplans in seinem heutigen Entwicklungsstand nur noch begrenzt ist. Zudem erfolgt die Planung und Beschaffung von Rollmaterial in deutlich kürzeren Zeithorizonten als jene von Angebots- und Infrastrukturplanung, weshalb es in dieser langfristig ausgerichteten Betrachtung eine untergeordnete Rolle spielt.

Die generierten Ausbauschritte lassen sich typologisch in drei Kategorien einteilen: neue Zugangspunkte (Knoten), neue Verbindungen (Kanten) oder bestehende Verbindungen ausbauen. Beide wirken sich potenziell sowohl auf die physische Infrastruktur als auch auf den Fahrplan aus. In der Fallstudie in Kapitel 4.4 wird detaillierter beschrieben, welche Art von Angebots- und Infrastrukturentwicklungen für welche Ausbautypen erforderlich sind.

3.4 Generierung von Szenarien

Neben der Infrastruktur werden auch mögliche Entwicklungen für die Umwelt (vgl. Kapitel 3.1) hergeleitet, um die Infrastrukturanpassungen in jenem Zustand der Umwelt zu bewerten, in welchem sie auch ihren Nutzen für die Gesellschaft erbringen. Dabei wird die Unsicherheit in der zukünftigen Entwicklung systematisch berücksichtigt, indem eine Vielzahl von Zukunftsszenarien generiert wird – in dieser Arbeit 100. Ziel dieses Vorgehens ist es, robuste Entwicklungen zu identifizieren, welche in einem Grossteil der zukünftig möglichen Umwelten einen hohen Nutzen erbringen. Einerseits erhöht dies die Aussagekraft und Robustheit der Bewertungen, andererseits stärkt es das Vertrauen der Stakeholder in diese Entscheidungsgrundlage im Planungsprozess.

Da die Szenarien spezifisch von der Bewertungsfunktion verwendet werden, müssen besonders solche Variablen modelliert werden, welche auch aussagekräftig für die Bewertung sind. Zudem müssen diese Variablen – ebenso wie die Infrastrukturausbauten – räumlich eindeutig verortet sein, damit der potenziell generierte Nutzen auf diese abgebildet werden kann. In der Verkehrsinfrastrukturplanung zählen hierzu insbesondere die Verteilung von Bevölkerung, Arbeitsplätzen, Einkaufs- und Freizeitmöglichkeiten sowie das Mobilitätsverhalten. Die Methode zur Szenarienerstellung ist grundsätzlich frei wählbar und kann beispielsweise auf Prognosen, Annahmen oder Kombinationen mehrerer Ansätze basieren. Grundsätzlich sollte jedoch ein räumliches Format für die Szenarien gewählt werden, welches sich sinnvoll mit der Infrastruktur verbinden lässt und nachvollziehbar für die Bewertungsfunktion verwendet werden kann. In dieser Arbeit werden die Szenarien generativ und zufallsbasiert erzeugt, um das breite Spektrum potenzieller Entwicklungen systematisch abbilden zu können.

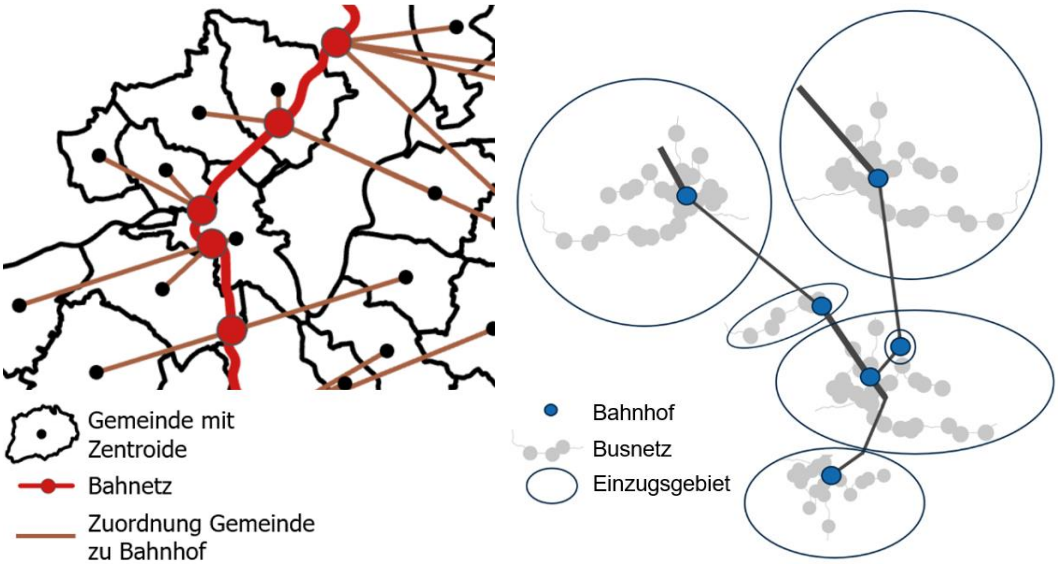
3.5 Umlegung der Nachfrage auf das Bahnnetz

Um den Nutzen des Bahnnetzes für die umliegende Umwelt modellieren zu können, muss die zukünftige Verkehrsnachfrage auf dieses umgelegt werden. Dafür müssen jedoch die Unterschiede in der räumlichen Ausprägung beider Komponenten überwunden werden: Während das Bahnnetz aus räumlich diskreten Elementen besteht, nämlich Knoten (Bahnhöfen) und Knoten (Verbindungen), so hat die Umwelt eine kontinuierliche Ausdehnung über den ganzen Perimeter.

Die Verknüpfung der Verkehrsnachfrage mit dem Bahnangebot erfolgt über die Bahnhöfe, welche als Zugangspunkte zum System dienen. Zentral ist dabei die Frage: Welche Gebiete nutzen welchen

Bahnhof? Um dies zu beantworten, müssen Einzugsgebiete für die Bahnhöfe definiert werden. Dafür stehen verschiedene Kriterien zur Verfügung. Eine Möglichkeit besteht darin, die Gebiete anhand der Entfernung zum nächsten Bahnhof zuzuweisen – entweder als Luftliniendistanz oder basierend auf der tatsächlichen Weglänge im Verkehrsnetz. Alternativ kann auch die effektive Reisezeit mit einem Zubringerverkehrsmittel (ÖV, zu Fuss, Fahrrad, MIV) als Mass der Entfernung verwendet werden: Ein Beispiel hierfür liefert (Röthlisberger 2024),welches modelliert hat, welche Gebiete über das bestehende Busnetz jeweils einem bestimmten Bahnhof zugeordnet werden können. Die beiden beschriebenen Ansätze sind in Abbildung 4 visualisiert.

Im Anschluss an die Zuordnung werden die Umweltvariablen – wie etwa die Bevölkerungszahl – innerhalb der jeweiligen Einzugsgebiete aggregiert und den entsprechenden Bahnhöfen zugewiesen. Dabei ist zu beachten, dass die räumliche Ausdehnung der betrachteten Infrastruktur in einem sinnvollen Verhältnis zur abgebildeten Umwelt stehen muss. Grundsätzlich sollte die modellierte Umwelt eine grössere Ausdehnung besitzen als die betrachtete Infrastruktur, da die Reiseketten, welche die Infrastruktur nutzen, häufig über die gewählten Korridorgrenzen der Infrastruktur hinausreichen. Dies ist insbesondere bei der Bahn zu beachten, da diese v.a. für längere Reisewege verwendet wird. Die Wahl der räumlichen Ausdehnung für Infrastruktur und Umwelt werden in der Fallstudie in Kapitel 4.3 genauer besprochen.



Quelle: Links: Vom Autor, Rechts: (Röthlisberger 2024)

Abbildung 4: Umlegung der Verkehrsnachfrage auf das Bahnnetz: Links: Zuordnung der Gemeinden zum jeweils nächstgelegenen Bahnhof basierend auf der Luftlinie. Rechts: Bildung von Einzugsgebieten anhand der Erschliessung durch das Busnetz.

3.6 Bewertung von Ausbauten

3.6.1 Überblick

Bei der Bewertung der generierten Ausbauten werden diese räumlich mit den zukünftigen Umweltszenarien und damit den Bedürfnissen an die Infrastruktur verknüpft. So kann analysiert werden, in welchem zukünftigen Zustand der Umwelt eine Infrastrukturentwicklung welchen zusätzlichen Nutzen generiert. Die Bewertung erfolgt mithilfe einer Bewertungsfunktion, welche

erlaubt, für jede Entwicklung in jedem Szenario einen vergleichbaren, monetären Nettonutzen in Schweizer Franken (CHF) zu berechnen. Als Referenz dient jeweils der Status quo, sodass der zusätzliche Nutzen oder auch die Kosten jeder Entwicklung im Vergleich zur heutigen Situation bestimmt werden können. Dazu müssen jedoch auch nicht direkt monetäre Kosten oder Nutzen, beispielsweise Landverbrauch oder resultierende Reisezeitersparnisse zunächst monetarisiert werden.

Ziel der Bewertung ist es, einen klaren Indikatorwert zu erhalten anhand dessen sich vorteilhafte Ausbauten identifizieren und priorisieren lassen. Die Bewertungsfunktion kann an die jeweilige Planungsaufgabe angepasst werden, sei es in Bezug auf die betrachtete Infrastruktur, die einbezogenen Kosten- und Nutzenfaktoren, den untersuchten Perimeter oder den Planungshorizont.

3.6.2 Stakeholder

Das Ziel der Bewertungsfunktion ist es, die Interessen und Bedürfnisse der relevanten Stakeholder zu widerspiegeln. Zu diesem Zweck werden zunächst die wichtigsten Interessengruppen identifiziert und deren Bedürfnisse und Anforderungen in Form von möglichen Kosten und Nutzen erfasst. Stakeholder sind in diesem Kontext Personen oder Organisationen mit den gleichen Interessen im Bezug auf die Infrastruktur. Diese umfassen beispielsweise den Besitzer der Infrastruktur, die Nutzer (EVU und Fahrgäste) oder auch die indirekt und direkt betroffene Öffentlichkeit. Die beteiligten Stakeholder im Planungsprozess wurden in Kapitel 2.2 besprochen.

Die Bedürfnisse der Stakeholder bilden die Grundlage für die Auswahl und Gewichtung der Bewertungskomponenten. Ziel ist es, eine möglichst umfassende Abdeckung gesellschaftlicher Bedürfnisse zu erreichen, um fundierte und akzeptierte Planungsentscheide zu ermöglichen.

3.6.3 Bewertungsfunktion

In der Bewertungsfunktion werden alle identifizierten Bewertungskomponenten der Stakeholder miteinander verrechnet, sodass schlussendlich für jede mögliche Infrastrukturerweiterung ein vergleichbarer Nettonutzen (im Vergleich zum Status quo) berechnet werden kann. Die Bewertung erfolgt in monetären Einheiten, um die unterschiedliche Kriterien auf einer gemeinsamen Skala vergleichbar zu machen. Dabei ist zentral, dass keine Überschneidungen oder Korrelationen zwischen den Komponenten auftreten, sodass Bedürfnisse nicht doppelt gewichtet werden. Ebenso ist vorausgesetzt, dass jede Komponente nachvollziehbar monetarisierbar ist und auf vorhandenen oder beschaffbaren Daten basiert, um die Funktion auch in der Praxis anwenden zu können. Die Auswahl und Gewichtung der Komponenten stellt einen iterativen Prozess dar, der in Abhängigkeit von Datenverfügbarkeit, Planungskontext und Rechenaufwand angepasst wird. Ein Beispiel für die Struktur der Bewertungsfunktion ist im Folgenden dargestellt:

$$K_{ij}^{total} = K_i^{Bau} + K_i^{\substack{Unterhalt,\\ ungedeckt}} + K_{ij}^{\substack{Betrieb,\\ ungedeckt}} + K_{ij}^{Reisezeit} + K_{ij}^{Zugangszeit} + K_{ij}^{externe\ Faktoren}$$

$$N_{ij}^{Netto} = K_{0,j}^{total} - K_{ij}^{total}$$

Die monetären Werte der Kosten K sind bis auf jene der externen Faktoren alle konsequent positiv und je nach Komponente abhängig von der Infrastrukturentwicklung i und dem Szenario j. Die Berechnung des Nettonutzens N_{ij}^{Netto} ergibt sich durch den Vergleich der gesamten Kosten einer Infrastrukturentwicklung K_{ij}^{total} mit den Kosten des Referenzzustand K_{ij}^{total}. Im Folgenden werden die einzelnen Kostenkomponenten genauer erläutert:

Baukosten umfassen alle Aufwände zur Erstellung neuer Infrastrukturelemente. Sie fallen einmalig zum Implementierungszeitpunkt einer Infrastrukturanpassung an.

Ungedeckte Unterhaltskosten umfassen sämtliche laufenden Ausgaben, die erforderlich sind, um die neuen Infrastrukturelemente dauerhaft in einem funktionsfähigen Zustand zu halten, sodass sie ihre geplante Leistung erbringen können. In dieser Arbeit fallen insbesondere jene Kosten an, die nicht durch die Trassenpreise der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) gedeckt werden. Sie entstehen jährlich ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Infrastruktur.

Ungedeckte Betriebskosten müssen finanziert werden, um den Betrieb von Zuglinien zu ermöglichen (inkl. aller verbundener Aufwände wie Fahrzeugkosten, Personal, Trassengebühren usw.). Insbesondere im Regionalverkehr können die Betriebskosten nicht vollständig von den Ticketeinnahmen gedeckt werden und müssen somit von Staat und Kantonen subventioniert werden.

Reisezeitkosten erfassen den Aufwand, der den Nutzerinnen und Nutzern durch die Reisezeit im betrachteten Zustand entsteht. Die Bewertung erfolgt auf Basis standardisierter Zeitwertansätze (CHF pro Stunde), die eine ökonomische Quantifizierung der Reisezeit ermöglichen.

Zugangszeitkosten erfassen den zeitlichen Aufwand, den Nutzer benötigen, um die nächste Bahnstation zu erreichen. Die Monetarisierung erfolgt auf Basis von Zeitwertansätzen (CHF pro Stunde).

Kosten externer Faktoren, d.h. Kosten oder Nutzen, die über den unmittelbaren Verkehrsbereich hinausgehen. Sie können sowohl positiv als auch negativ ausfallen – je nachdem, ob sie einen Vor- oder Nachteil für die betroffenen Stakeholder darstellen. Zu den negativen Effekten zählen beispielsweise veränderte Landnutzung, erhöhte CO_2-Emissionen oder zusätzliche Lärmbelastung. Positive Wirkungen können hingegen durch indirektes Wirtschaftswachstum oder durch Vorteile infolge einer Verkehrsverlagerung auf andere Verkehrsträger entstehen.

3.7 Darstellen der Ergebnisse

Die Ergebnisse müssen schlussendlich den Planer*innen so präsentiert werden, dass sie sie bei der Entscheidungsfindung wirkungsvoll unterstützen. Einerseits ist eine übersichtliche und vergleichbare Darstellung erforderlich, bei der auf einen Blick erkennbar ist, welche Infrastrukturvarianten – auch bei einer grossen Anzahl – besonders vorteilhaft abschneiden. Hierfür kommen beispielsweise Boxplots zum Einsatz, die den Nettonutzen über verschiedene Szenarien hinweg visualisieren und so auch Aussagen zur Robustheit einzelner Varianten ermöglichen.

Ebenso wichtig ist die transparente und nachvollziehbare Aufschlüsselung der Bewertungs- und Kostenkomponenten. Nur wenn ersichtlich ist, wie sich ein Gesamtnutzen zusammensetzt, lassen sich Entscheidungen sachlich begründen. Karten spielen hierbei eine zentrale Rolle: Sie visualisieren räumliche Zusammenhänge wie Reiseströme, die geografische Verteilung der entstehenden Nutzen oder die Lage der neuen Infrastruktur.

Das Ziel der Visualisierung besteht darin, die Ergebnisse sowohl inhaltlich als auch räumlich nachvollziehbar darzustellen. Auf diese Weise wird eine transparente Grundlage geschaffen, die den Vergleich verschiedener Infrastrukturvarianten ermöglicht und eine fundierte Entscheidungsfindung unterstützt.

4 Fallstudie

4.1 Aufbau Toolbox

Die in dieser Arbeit angewendete Methodik wurde in Form einer Python-basierten Toolbox implementiert und erprobt. Sie dient als Prototyp für eine zukünftige Software, die Planer*innen als datenbasiertes Tool zur Entscheidungsunterstützung im Arbeitsalltag zur Verfügung stehen soll. Die Toolbox baut auf den Arbeiten von (F. M. Marggi 2024), (Röthlisberger 2024) sowie des Betreuers Arnor Elvarsson auf und wurde im Rahmen dieser Arbeit neu strukturiert und weiterentwickelt.

Im Zuge dieser Weiterentwicklung wurden sämtliche Module der Toolbox angepasst. Bestehende Komponenten wie beispielsweise die Infrastrukturgenerierung und die Nachfrageumlegung von (Röthlisberger 2024) wurden ebenfalls aktualisiert, um deren Ergebnisse in einer umfassenderen Bewertungsmethodik interpretieren zu können. Die Struktur der Toolbox ist in Abbildung 5 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Module folgt in den nachstehenden Unterkapiteln.

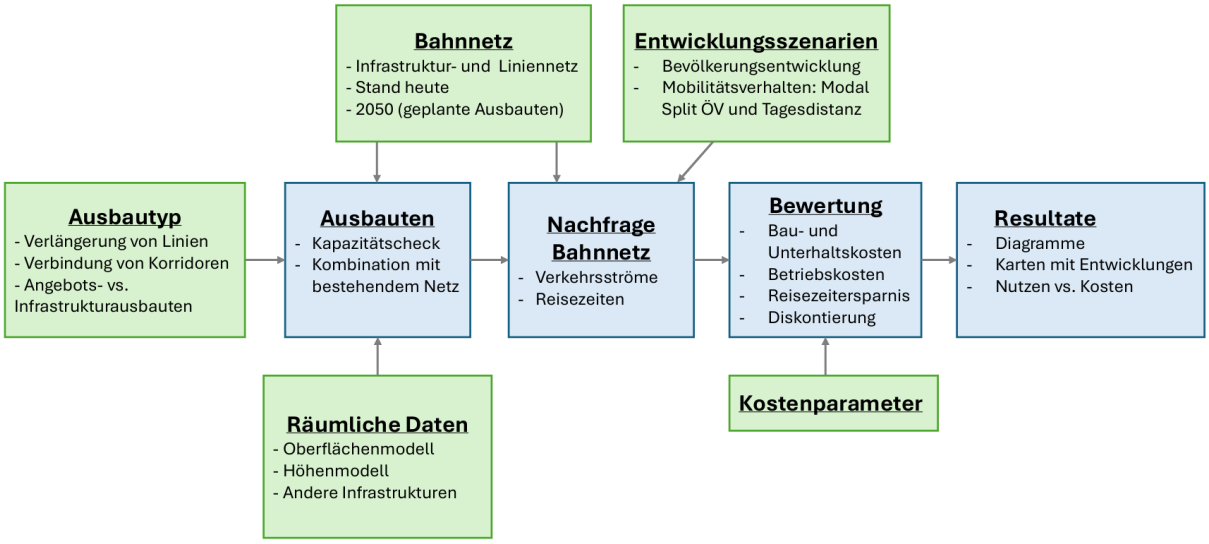


Abbildung 5 Modulstruktur der Python-basierten Toolbox.

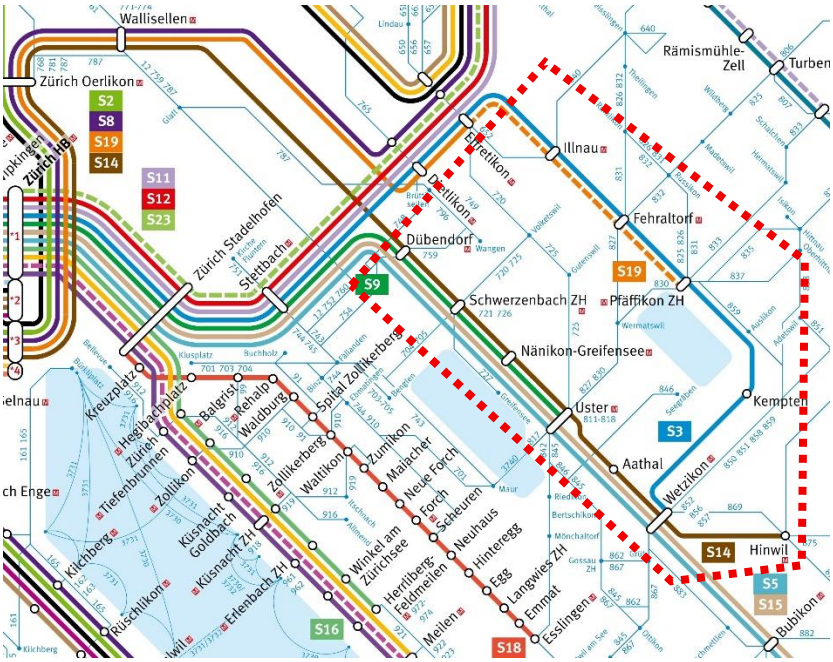
4.2 Bahnnetz

Als Fallstudiengebiet wurde wie bereits in der vergangenen Arbeit von (Röthlisberger 2024) der Korridor Dübendorf – Hinwil verwendet. Dieser setzt sich aus einer überwiegend zweigleisigen Hauptlinie von Dübendorf bis Wetzikon sowie einer eingleisigen Linie von Effretikon über Illnau und Wetzikon bis nach Hinwil zusammen. Die wichtigsten Bahnknoten im Korridor sind Uster und Wetzikon, wo beide Linien miteinander verknüpft sind. Die Hauptstrecke zwischen Zürich HB und Winterthur wurde bewusst ausgeklammert, um den betrachteten Korridor isoliert analysieren zu können. Eine Übersicht bietet Abbildung 6.

Der Korridor wird überwiegend durch den Personenverkehr genutzt und ist vollständig in das Netz der S-Bahn Zürich eingebunden. Dementsprechend ist das Angebot stark auf das Zentrum Zürich ausgerichtet – alle S-Bahnen im Korridor verkehren via Zürich. Das heutige Angebot umfasst folgende Linien:

- S3, S9 und S14 stellen die Grunderschliessung sicher und bedienen sämtliche Stationen auf ihrer Strecke. Diese Linien gehören zum langsamen Produkt und verkehren im 30-Minuten-Takt. Auf dem Abschnitt Dübendorf–Uster ergänzen sich S9 und S14 zu einem 15-Minuten-Takt.
- S5 und S15 bilden das schnelle Produkt und halten nur an Bahnhöfen mit überregionaler Bedeutung. Sie bieten zudem weitere Verbindungen nach Rapperswil an. Gemeinsam stellen sie ebenfalls einen 15-Minuten-Takt sicher.
- S19 fungiert als Verstärkerlinie und verkehrt ausschliesslich in den Hauptverkehrszeiten.

Neben der räumlichen Eingrenzung erfolgte auch eine zeitliche Abgrenzung: Der Korridor wurde sowohl im heutigen Zustand (vgl. Abbildung 6) als auch im geplanten Ausbauschritt 2035 (AS2035) betrachtet (siehe Abbildung 7). Letzterer bildet zugleich den erwarteten Angebots- und Infrastrukturzustand für das Jahr 2050 ab.



Quelle: (ZVV 2025b)

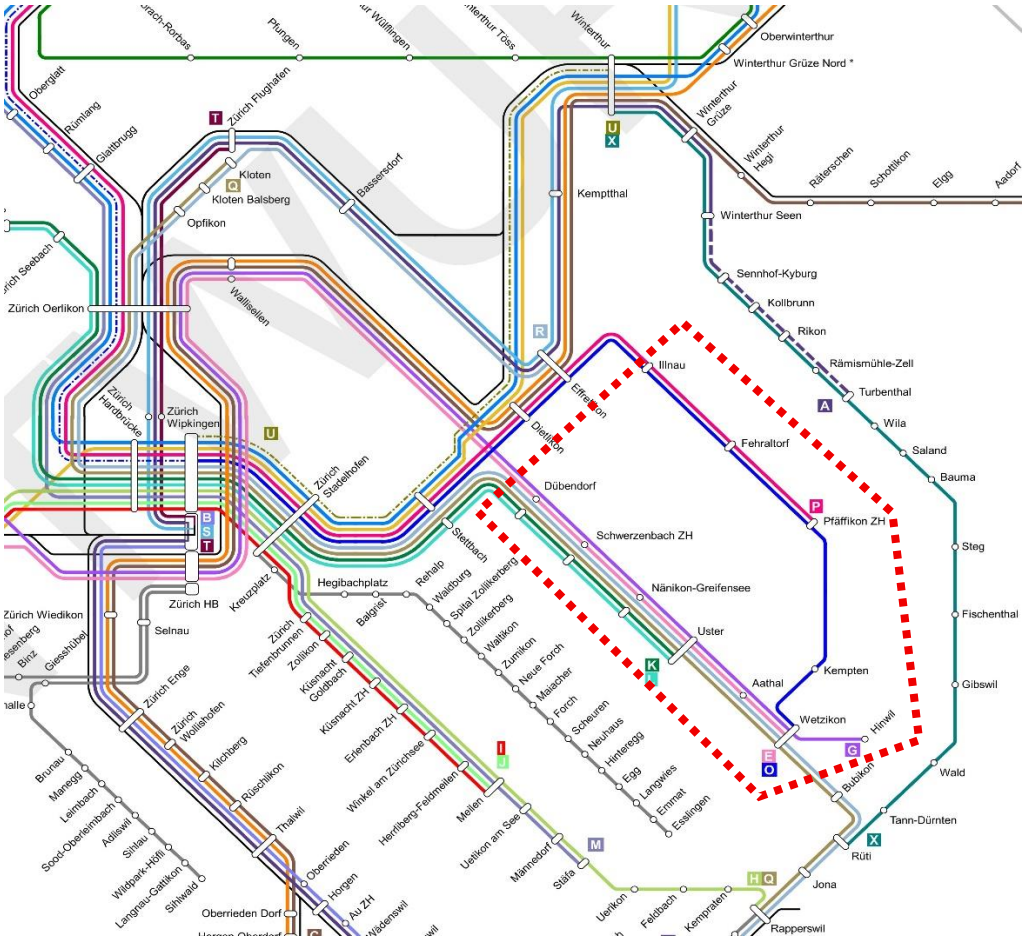
Abbildung 6 Heutiges Liniennetz der S-Bahn Zürich im Fallstudiengebiet Dübendorf – Hinwil.

Im Rahmen des AS2035 sind im Korridor umfangreiche Angebotserweiterungen geplant. Diese sind wie folgt (ZVV 2025a):

- Ganztägige Einführung eines 15-Minuten-Takts auf der Strecke Zürich–Effretikon–Pfäffikon ZH.
- Verdichtung des langsamen Produkts Zürich–Uster auf einen durchgehenden 15-Minuten-Takt mit Halt an allen Stationen.
- Einführung eines schnellen Produkts Zürich HB–Oerlikon–(nonstop)–Uster–Hinwil im 30-Minuten-Takt.

Für die Umsetzung dieser Angebotsausbauten reicht die heutige Infrastruktur mit ihrer Kapazität nicht aus, daher sind folgende infrastrukturelle Anpassungen nötig (Bundesamt für Verkehr 2025a):

- 4. Gleis Bahnhof Stadelhofen
- Anpassung Gleisanlagen und kreuzungsfreie Entflechtung Bahnhof Wallisellen
- Doppelspurausbau Uster - Aathal



Quelle: (ZVV 2025a)

Abbildung 7 Bahnnetz der Fallstudie mit eingezeichnetem Perimeter. Das Liniennetz zeigt den Zustand mit dem Ausbauschritt 2035.

Grundsätzlich wurde der Zustand des AS2035 als Grundnetz für die Generierung von Infrastrukturausbauten in dieser Arbeit verwendet. Dies, da die Planung und Realisierung von neuen Bahninfrastrukturen gut 25 Jahre in Anspruch nehmen kann und Ausbauten, welche heute initiiert werden, frühestens 2050 umgesetzt werden könnten. Die beiden Netzzustände von heute und 2050 werden zudem mit der in dieser Arbeit entwickelten Bewertungsmethodik miteinander verglichen. Dadurch lassen sich einerseits die verkehrlichen und wirtschaftlichen Vorteile der geplanten Ausbauten für den Korridor quantifizieren. Andererseits ermöglicht der Vergleich eine Validierung der Bewertungsfunktion an einem real geplanten Ausbauprogramm, was ihre Anwendbarkeit und Aussagekraft im Hinblick auf zukünftige Infrastrukturentwicklungen untermauert.

4.3 Räumliche Einbettung des Korridors

Das Bahnnetz innerhalb des Untersuchungsperimeters wurde bereits im vorangehenden Kapitel detailliert beschrieben. Dieses Kapitel behandelt das räumliche Zusammenspiel zwischen der Ausdehnung der Verkehrsnachfrage und des Bahnnetzes im Kontext des Fallstudiengebiets. Ziel der Modellierung ist es, die Umweltbedingungen so abzubilden, dass innerhalb des Perimeters verlässliche Aussagen über den Nutzen von Ausbauten getroffen werden können. Dazu ist es je nachdem erforderlich, einen deutlich grösseren geografischen Raum zu modellieren als den Korridor selbst.

Ein zentraler Grund ist, dass die Bahn primär für längere Reisewege eingesetzt wird. Daher hat nur ein kleiner Teil der Reisewege ihren Start und zugleich ihr Ziel im Korridor. Hinzu kommt die starke verkehrliche Ausrichtung der Region auf das Zentrum Zürich, welches daher zwingend in das Modell integriert werden muss.

Um eine realitätsgetreue Abbildung der Nachfrage im Perimeter zu gewährleisten, wurde daher die gesamte Verkehrsnachfrage des Kantons Zürich inklusive angrenzender Gebiete berücksichtigt. Auch das Bahnnetz wurde entsprechend erweitert: Sämtliche S-Bahn-Linien, die den betrachteten Korridor durchqueren, wurden vollständig abgebildet. Zusätzlich wurden die Verbindungen zu den wichtigen benachbarten Zentren Zürich und Winterthur integriert. Ebenso wurden alle Bahnlinien berücksichtigt, die unmittelbar an den Korridor angrenzen. Dadurch wird sichergestellt, dass Nachfrage aus dem Umland nicht künstlich auf Bahnstrecken innerhalb des Korridors projiziert wird, sondern korrekt über die umliegenden Strecken verläuft. Um eine fehlerhafte Modellierung von Durchgangsverkehr durch den Korridor zu vermeiden, der in der Realität gar nicht existiert, wurden auch die schnellen S-Bahn-Verbindungen zwischen Winterthur, Zürich und Pfäffikon in das Modell aufgenommen. Die Methodik zur Berechnung der Verkehrsnachfrage und deren Umlegung wird ausführlicher in Kapitel 4.6 erläutert.

Auf eine noch grössere räumliche Ausdehnung des Modells wurde bewusst verzichtet. Der Grund liegt in der überproportional ansteigenden Rechenzeit für die Berechnung der Verkehrsströme im Bahnnetz. Infrastruktur- und Angebotsanpassungen wurden generiert und bewertet, sofern sich ein Teil davon im Korridor befindet. Die genaue räumliche Ausdehnung des Fallstudienkorridors sowie der modellierten Nachfrage und des Bahnnetzes sind in Abbildung 8 dargestellt.

Quelle: Eigene Darstellung. Datenquellen siehe Kapitel A1.

Abbildung 8 Fallstudienperimeter Dübendorf - Hinwil mit modelliertem Bahnnetz und Verkehrsnachfrage sowie mit generierten Verbindungskurven.

4.4 Generierung von Angebots- und Infrastrukturausbauten

4.4.1 Typen von Ausbauten

Wie bereits in Kapitel 3.3 erklärt, muss bei der Bahn zwischen Angebots- und Infrastrukturausbauten unterschieden werden. In dieser Arbeit sind Angebotsausbauten der Treiber und die Infrastruktur wird so angepasst, dass das geplante Angebot darauf produziert werden kann. Es wurden vier Kategorien von Angebotsausbauten definiert: Neue Direktverbindung, neuer Zugangspunkt sowie eine schnellere

oder häufigere Verbindung. Je nach Ausbaukategorie sind andere Elemente des Bahnsystems betroffen, welches sich grundsätzlich in Infrastruktur- und Angebotselemente unterteilen lässt. Die Infrastrukturelemente, bestehend aus Kanten (Streckenabschnitten) und Knoten (z. B. Bahnhöfen oder Verzweigungen), können je nach Entwicklung entweder modifiziert oder neu erstellt werden. Die Angebotselemente umfassen die Bedienung der Stationen durch Linien. Hier kann entweder eine bestehende Linie angepasst (immer möglich) oder eine neue Linie erstellt werden. Nicht bei allen Ausbauten ist eine Anpassung im Linienplan, d.h. welche Haltestellen von welchen Linien wie verbunden werden, nötig. Eine Übersicht der möglichen Ausbautypen und der betroffenen Elemente des Bahnsystems ist in Tabelle 1 zu sehen.

Für das bessere Verständnis hier ein Lesebeispiel: Für eine neue Direktverbindung, die über eine neue Kante verläuft, muss diese zuerst im Infrastrukturnetz geschaffen werden. Gegebenenfalls ist auch ein Ausbau der Kapazität eines betroffenen Bahnhofs erforderlich. Es ist möglich, die neue Direktverbindung mit einer neuen Linie oder der Erweiterung einer bestehenden Linie zu produzieren. Die Anpassung des Linienplans ist zwingend durch die neue Verbindung.

x = Zwingend (x) = Möglich **Typ**	**Infrastrukturelement**				**Angebotselement**	
	Neue Kante	Attributsänderung Kante	Neuer Knoten	Attributsänderung Knoten	Neue Linie	Änderung Linienplan
Neue Direktverbindung						
auf bestehenden Kanten		(x)		(x)	(x)	x
auf neuen Kanten	x	(x)		(x)	(x)	x
Neuer Zugangspunkt			x		(x)	x
Schnellere Verbindung	(x)	(x)			(x)	(x)
Häufigere Verbindung	(x)	(x)		(x)	(x)	(x)

Quelle: Angepasst und erweitert von (Röthlisberger 2024).

Tabelle 1 Übersicht möglicher Typen von Angebotsausbauten sowie die betroffenen Infrastruktur- und Angebotselemente.

In der Arbeit wurden zwei Angebotsausbauten für die algorithmische Generierung umgesetzt. Einerseits neue Direktverbindungen auf (teilweise) neuen Kanten, indem ganze Korridore durch eine Direktverbindung miteinander verbunden werden. Diese Angebotsausbauten werden in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben. Andererseits neue Direktverbindungen auf existierenden Kanten, indem S-Bahn Linien an ihrem Endpunkt um eine Station verlängert werden.

In dieser Arbeit liegt ein besonderer Fokus auf der Schaffung neuer Direktverbindungen, da Umsteigevorgänge die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs deutlich verringern. Laut (Axhausen u. a. 2014) entspricht ein Umstieg trotz passendem Anschluss mindestens einer zusätzlichen Fahrzeit von 12 Minuten im Zug. Darüber hinaus stellt ein Umstieg einen Reiseunterbruch dar, der es erschwert, die Fahrtzeit sinnvoll zu nutzen – etwa zum Arbeiten. Die Reduktion von Umsteigevorgängen birgt daher ein grosses Potenzial zur Attraktivitätssteigerung von Bahnverbindungen. Im Vergleich dazu

sind Beschleunigungen bestehender Strecken bei gleicher Reisezeitersparnis oft mit deutlich höheren Kosten verbunden.

4.4.2 Linien um eine Station verlängern

Der Algorithmus zur Verlängerung von bestehenden Linien um eine zusätzliche Station wurde bereits in der Arbeit von (Röthlisberger 2024) entwickeln. In dieser Arbeit wurde der Ansatz in die überarbeitete Bewertungsmethodik integriert und weiterentwickelt, sodass Erweiterungen für beliebige Bahnnetze generiert werden können. Die Funktionsweise wird daher im Folgenden in verkürzter Form beschrieben:

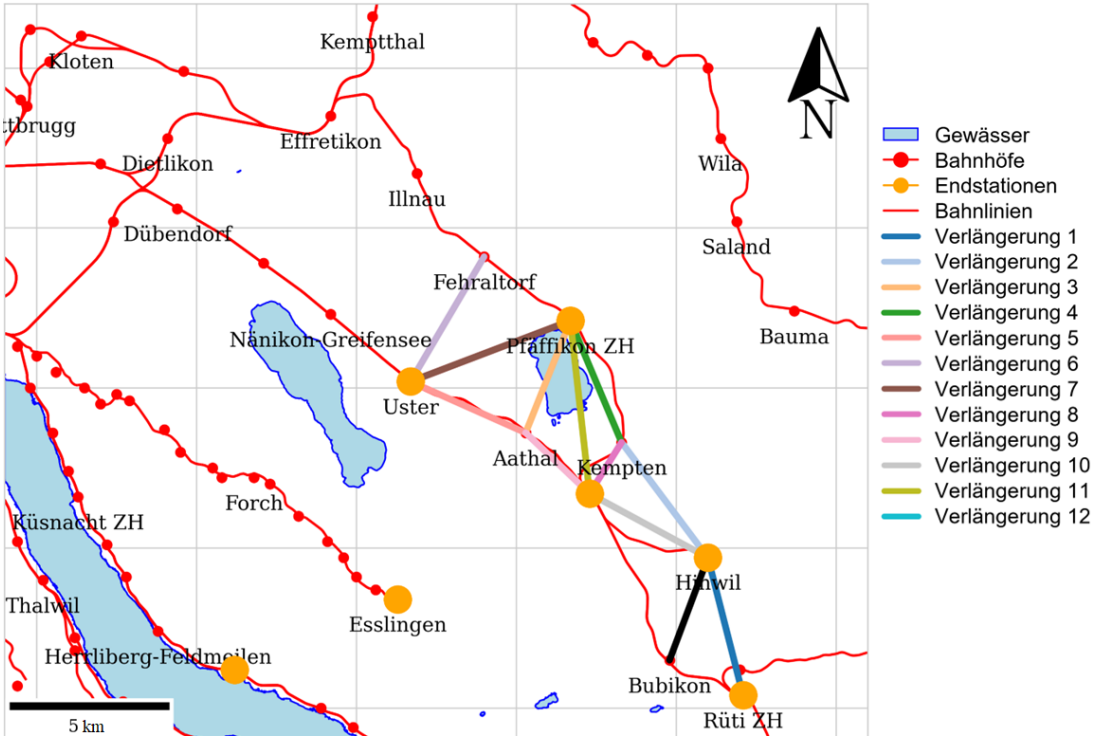
Die Linien werden an ihren Endstationen verlängert – dort, wo sie normalerweise wenden würden. Durch eine Verlängerung erhalten zusätzliche Bahnhöfe einen direkten Anschluss an die bestehende Linie, was neue Direktverbindungen ermöglicht. Ausserdem besteht die Chance, dass sich die Betriebskosten durch die Verlängerung nur geringfügig erhöhen, falls dadurch lange, fahrplanbedingte Standzeiten besser durch die Verlängerung genutzt werden können.

Die Generierung der Verlängerungen erfolgt in vier Schritten:

1. Die Endknoten der Linien werden identifiziert.
2. Jeder Endknoten wird mit bis zu *n* nächsten Bahnhöfen verknüpft, die sich innerhalb eines Radius von *r* Kilometern befinden.
3. Liniennummern werden zugewiesen und redundante Verbindungen entfernt.
4. Die Reisezeiten der neuen Verbindungen werden auf Basis der bestehenden Infrastruktur berechnet.

Der beschriebene Algorithmus wurde im betrachteten Korridor mit folgenden Parametern angewendet: maximale Anzahl Verbindungen n innerhalb eines Suchradius für Verlängerungen r von 10 km. Ausgehend von den Endpunkten Uster, Pfäffikon ZH, Wetzikon und Hinwil werden auf diese Weise insgesamt 12 Infrastrukturausbauten generiert. Berücksichtigt wurden nur neue Endpunkte, die durch eine im Korridor verkehrende S-Bahn bedient werden. Ausserdem wurden nur Ausbauten generiert, welche an Bahnhöfen enden, welche durch andere modellierte Linien im Korridor bedient werden. Die generierten Verlängerungen sind in Abbildung 9 dargestellt.

Die Reisezeiten der neuen Direktverbindungen wurden anhand des bestehenden Bahnnetzes berechnet. Dieses ist als segmentiertes Netz aus Kanten modelliert, die jeweils zwei Knoten verbinden, um die kürzesten Wege zu ermitteln. Beispielsweise verläuft eine verlängerte Verbindung von Uster nach Kempten über Aathal und Wetzikon ZH. Aus der berechneten Strecke und einer angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h wurde die jeweilige Reisezeit geschätzt. Richtungswechsel innerhalb des Netzes konnten bis zum Abschluss der Arbeit nicht erkannt und somit nicht in die Reisezeit einbezogen werden.



Quelle: Eigene Darstellung. Datenquellen siehe Kapitel A1.

Abbildung 9 Generierte Verlängerungen von Linien um eine Station im Korridor Dübendorf – Hinwil.

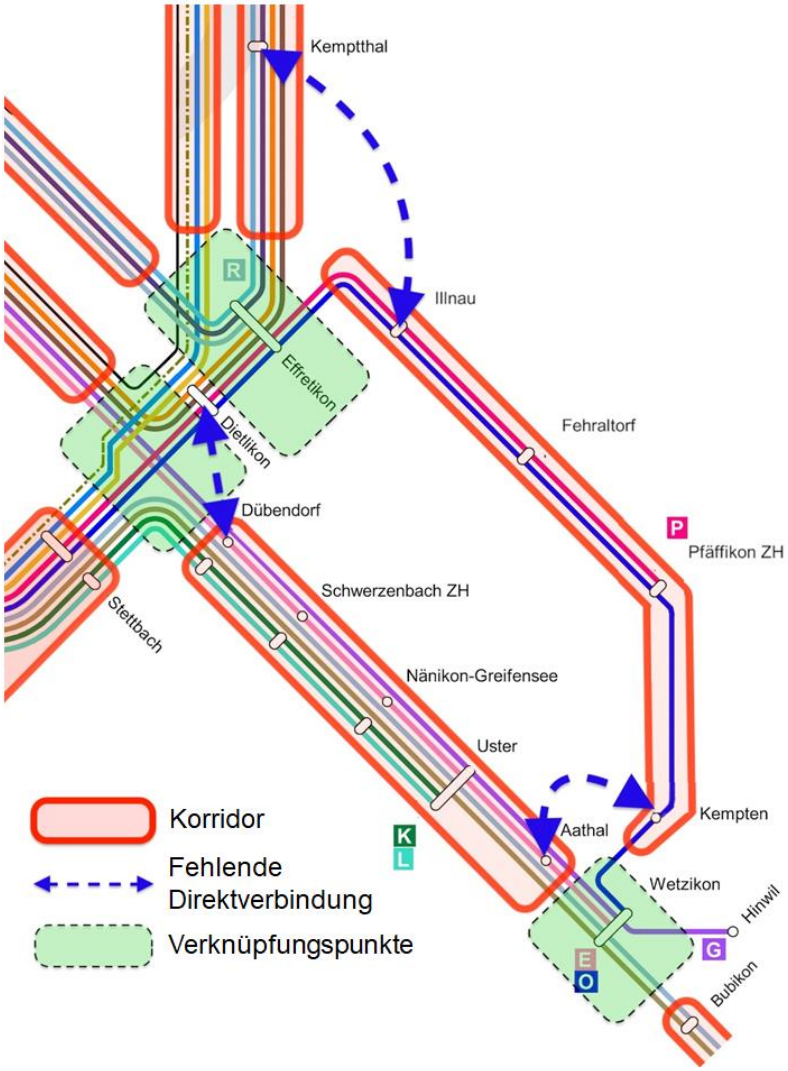
4.4.3 Verbindung von Korridoren

Im Rahmen dieser Infrastrukturerweiterung sollen nicht nur einzelne Stationen, sondern ganze Korridore durch neue Direktverbindungen besser miteinander verknüpft werden. Dadurch lassen sich potenziell höhere Nutzen erzielen – insbesondere durch Gewinne bei der komfortgewichteten Reisezeit. Auch im betrachteten Korridor besteht erhebliches Verbesserungspotenzial durch solche neuen Verbindungen: So fehlt beispielsweise eine Direktverbindung nach Winterthur – dem zweitgrössten Zentrum und Bahnknoten der Region. Diese Problematik ist jedoch kein Einzelfall, sondern findet sich in ähnlicher Form auf zahlreichen Netzabschnitten im ganzen Land wieder. Solche neuen Verbindungen zwischen Korridoren werden grundsätzlich angebotstechnisch durch neue Linien geschaffen. Wäre hingegen auf dem bestehenden Netz dafür ein Wendevorgang erforderlich, so sind zusätzlich infrastrukturelle Massnahmen in Form von Verbindungskurven notwendig.

Konzeptionell lässt sich das Bahnnetz in Korridore und Verknüpfungspunkte unterteilen (siehe Abbildung 10): Ein Korridor ist eine lineare Strecke, eine Kette aus Stationen, welche nur auf eine Weise durchfahren werden kann, ähnlich einer Strasse. Bei Verknüpfungspunkten werden mehrere Korridore miteinander verbunden, wodurch ein Wechsel von einem Korridor auf potenziell mehrere andere möglich wird – vergleichbar mit einer Strassenkreuzung. Im Unterschied zum Strassenverkehr, wo in der Regel alle Abbiegebeziehungen möglich sind, sind solche bei der Bahn durch die grossen erforderlichen Radien häufig eingeschränkt.

Der hier vorgestellte Typ von Infrastrukturgenerierung konzentriert sich darauf, fehlende umsteigefreie Abbiegebeziehungen in Verknüpfungspunkten gezielt zu ergänzen – entweder rein angebotstechnisch durch neue Linien im Fahrplanangebot oder zusätzlich infrastrukturell durch Verbindungskurven, um

betriebsaufwändiges Wenden zu vermeiden. Auf neue Direktverbindungen mit Wendevorgängen wurde bewusst verzichtet, da diese betrieblich sehr aufwendig sind und mit erheblichen Reisezeitverlusten einhergehen. So wird das Wenden innerhalb einer Linie auf dem Netz der Zürcher S-Bahn mit Ausnahme der S24 auch nicht praktiziert.

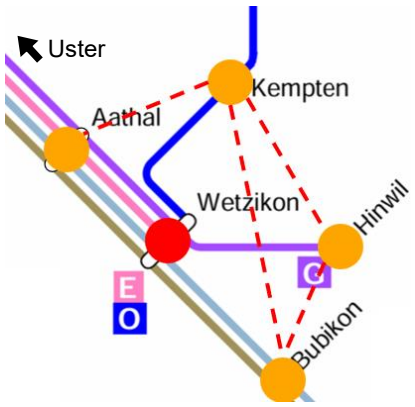


Quelle: Eigene Darstellung. Liniennetzplan von (ZVV 2025a).

Abbildung 10 Einteilung des Netzes in Korridore und Verknüpfungspunkte zur Identifizierung von fehlenden Direktverbindungen.

Zur Generierung neuer Korridorverbindungen werden zunächst die fehlenden Direktverbindungen zwischen bestehenden Korridoren identifiziert. Der entsprechende Algorithmus zur Erkennung dieser erfolgt in fünf Schritten und wird in Abbildung 11 erklärt:

1. Ignoriere **Haltepolitik** der Linien
2. Identifiziere Knoten mit **> 2 Kanten**
   → *Zentrumsknoten*
3. Markiere alle **angrenzenden** Knoten
   → *Grenzknoten*
4. Prüfe ob zwischen allen Grenzknoten eine **Direktverbindung** besteht
5. Wenn nicht, markiere diese Verbindung als **fehlend**



Quelle: Eigene Darstellung. Liniennetzplan von (ZVV 2025a).

Abbildung 11 Erklärung Algorithmus zur Identifikation von fehlenden Direktverbindungen von Korridoren.

Für die Implementierung des Algorithmus wurde das Bahnangebot als Graph modelliert, wobei die Stationen durch Knoten und die Linienverläufe zwischen den Stationen durch Kanten dargestellt sind. Die Haltepolitik der einzelnen Linien wurde dabei nicht berücksichtigt – es wurde angenommen, dass jede S-Bahn an allen Stationen hält. Parallele Kanten wurden zusammengefasst, sodass zwischen zwei Knoten höchstens eine Kante existiert, jedoch mit der Information, welche Linien die Kante verwenden. Diese Vereinfachung ist notwendig für die korrekte Darstellung des Netzes für den Algorithmus. Die Haltepolitik einzelner Linien fällt zudem in einen kurzfristigeren Planungshorizont als jener, den diese Arbeit adressiert, und wird deshalb bewusst ausgeklammert. Da im verwendeten Netz keine Richtungsinformation der Bahnstrecken an Verknüpfungspunkten enthalten ist, kann der Algorithmus jedoch nicht unterscheiden, ob für die Behebung einer fehlenden Direktverbindung eine Verbindungskurve nötig ist, oder es nur einer angebotstechnischen Massnahme bedarf. Wird in einer weiterführenden Arbeit die Richtung von Bahnstrecken in Verknüpfungspunkten dem Graphen hinzugefügt, ist der Algorithmus entsprechend aufwärtskompatibel.

Für das erweiterte Bahnnetz der Fallstudie (welches über den eigentlichen Korridor Dübendorf–Hinwil hinausgeht), konnten insgesamt 9 fehlende Direktverbindungen identifiziert werden, welche in Abbildung 12 dargestellt sind. Für eine detaillierte Bewertung werden in dieser Arbeit jedoch nur fehlende Direktverbindungen innerhalb oder angrenzend an das Fallstudiengebiet weiterverfolgt.

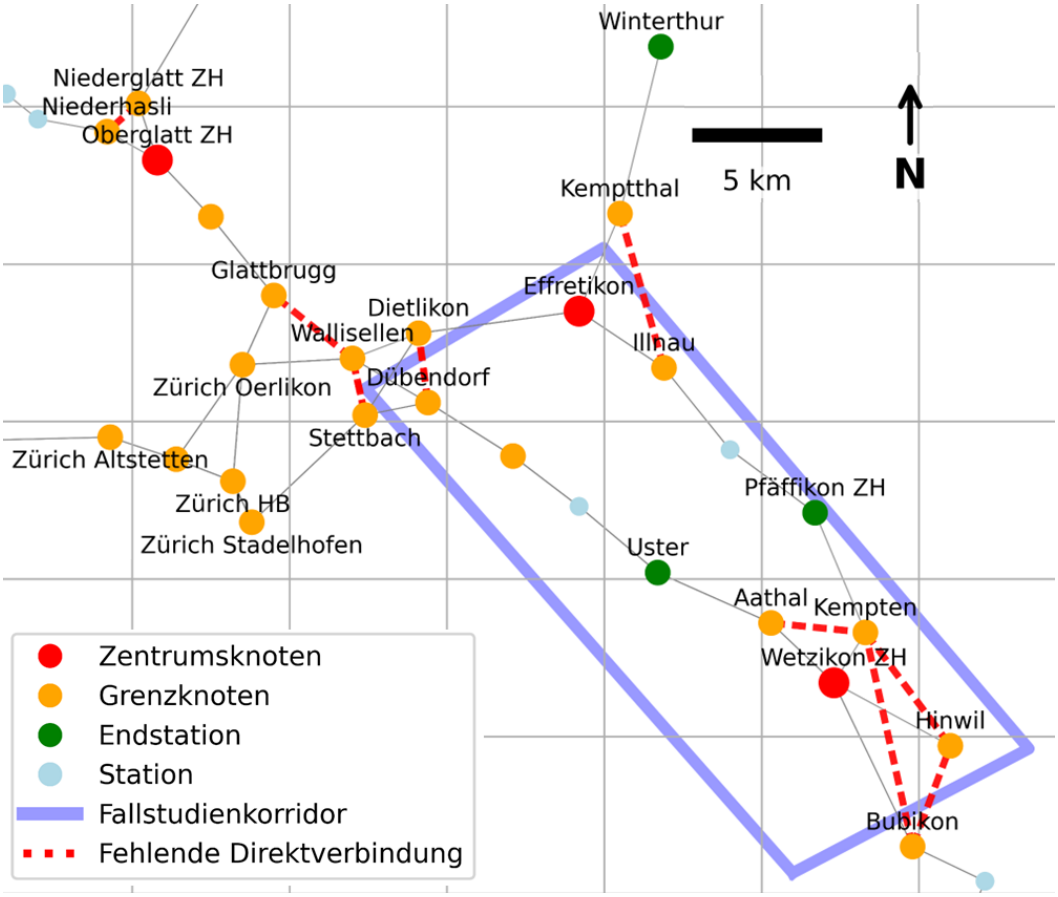


Abbildung 12 Identifizierte fehlende Direktverbindungen für das erweiterte Bahnnetz der Fallstudie. Zentrumsknoten die gleichzeitig auch Grenzknoten sind, sind als Grenzknoten markiert. Dies ist möglich bei überlappenden Verknüpfungsgebieten.

4.4.4 Neue S-Bahn Linien generieren

Zur Behebung der im vorherigen Kapitel identifizierten fehlenden Direktverbindungen werden ganze neue Linien generiert. Diese Linien bedienen die fehlenden Direktverbindungen zwingend und verlaufen von dort aus in beide Richtungen zu sinnvollen Knotenbahnhöfen. Der Algorithmus zur Generierung der Linien ist in Abbildung 13 dargestellt und erklärt.

1. Wachse von fehlender Verbindung (roter Pfeil) über angrenzende Kanten
2. Besuche keine anderen Grenzknoten der «Kreuzung» als jene der fehlenden Verbindung
3. Beende Linien nur an bestehenden Endstationen

4. Für jede Abzweigmöglichkeit, generiere eine neue Linie

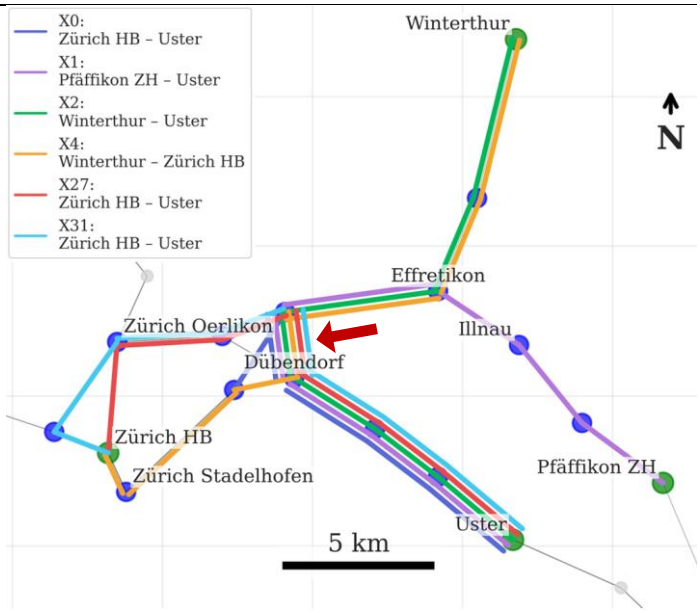


Abbildung 13 Erklärung Algorithmus zur Generierung von neuen S-Bahn Linien ausgehend von fehlenden Direktverbindungen (siehe roter Pfeil).

Bei der Generierung neuer Linien ist es zentral, dass diese die Direktverbindung sinnvoll nutzen und tatsächlich eine neue Verbindung zwischen zwei Korridoren herstellen. Daher wird in Schritt 2 sichergestellt, dass die generierte Linie das Verknüpfungspunkt nur über die neu generierte Verbindungskante passiert und nicht beispielsweise in Abbildung 13 die Route Niederhasli – Niederglatt ZH – Oberglatt ZH – Rümlang nimmt und so zwei Korridore befährt, welche schon heute durch die S15 verbunden sind. Durch die fehlende Richtungsinformation im Graphen wird diese Restriktion jedoch teils vom Algorithmus umgangen.

Neu generierte Linien dürfen nur an bestehenden Endstationen enden. Dies dient einerseits der Begrenzung der Variantenanzahl auf ein sinnvolles Mass – andernfalls würden aus den identifizierten Direktverbindungen über 900 Linien erzeugt werden. Andererseits wird auch sichergestellt, dass Linien an Bahnhöfen enden, an denen sinnvolle Anschlussmöglichkeiten bestehen und eine höhere Netzwirkung erzielt wird. Grundsätzlich besteht jedoch auch die Möglichkeit, neue potenzielle Endstationen zu definieren – insbesondere dann, wenn geplant ist, bestimmte Stationen künftig in ihrer Funktion aufzuwerten.

Bis jetzt enden Linien jeweils am nächsten Knotenpunkt, um die Variantenanzahl, mit Blick auf den nötigen Rechenaufwand, weiter zu begrenzen. Es wäre jedoch ohne weiteres möglich, für jeden möglichen Endpunkt der Linie eine neue Variante zu erzeugen.

Der Algorithmus weist in seiner aktuellen Form noch Optimierungspotenzial auf. Wie bereits bei der Identifikation fehlender Direktverbindungen fehlt im zugrunde liegenden Graphen die Richtungsinformation der Bahnstrecken in Verknüpfungspunkten. Daher kann es vorkommen, dass eine generierte Linie ausserhalb der neuen Direktverbindung, aus welcher sie gewachsen ist, einen Wendevorgang erfordern würde. Solche Fälle müssen bei der späteren Bewertung der Varianten bislang manuell erkannt und aussortiert werden. Wird dem Netzmodell die Fahrtrichtung der Bahnstrecken hinzugefügt, ist der Algorithmus problemlos erweiterbar und aufwärtskompatibel.

4.4.5 Projektierung Verbindungskurven

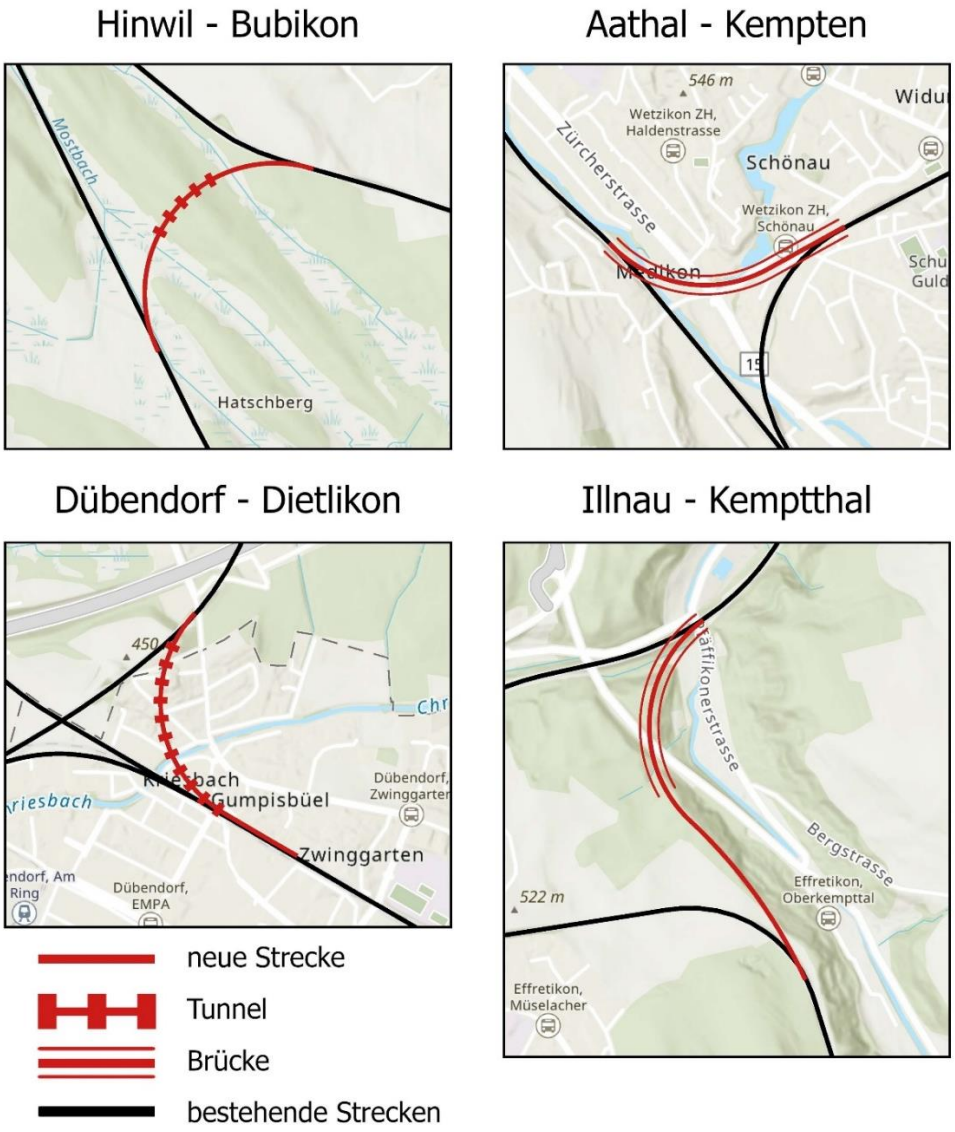
Einige generierte S-Bahn Linien erfordern auf den neu geschaffenen Direktverbindungen als infrastrukturelle Massnahme Verbindungskurven, um ein Wenden der Fahrzeuge innerhalb des Linienverlaufs zu vermeiden. Ob eine solche Verbindungskurve notwendig ist, wurde im Rahmen dieser Arbeit manuell geprüft. Diese Entscheidung könnte jedoch künftig automatisiert vom Algorithmus übernommen werden, sofern im zugrunde liegenden Graphen Richtungsinformationen der Strecken integriert werden.

Die Verbindungskurven wurden unter Berücksichtigung eines Minimalradius (abhängig von der vorgesehenen Entwurfsgeschwindigkeit) sowie der Minimierung der neu zu errichtenden Gleislängen generiert. Sie wurden eingleisig definiert. Beim Passieren von Siedlungsgebiet erfolgt die Trassierung unterirdisch, während grössere Höhenunterschiede im Gelände durch Tunnel oder Brücken überwunden werden. Für die identifizierten fehlenden Direktverbindungen im Korridor aus Kapitel 4.4.3 waren in vier Fällen Verbindungskurven nötig, diese sind in Abbildung 14 dargestellt.

Zur Berechnung des Minimalradius auf Basis der Entwurfsgeschwindigkeit wurde folgende Formel für die Höchstgeschwindigkeit in Kurven verwendet. Sie stammt aus der Eisenbahn Bau- und Betriebsordnung (EBV):

$$v = \sqrt{\frac{R}{11.8} * (u + u_f)}$$ (Bundesamt für Verkehr 2012)

Mit dem Einsetzen der Höchstgeschwindigkeit $v = 80\ km/h$, einem Überhöhungsfehlbetrag $u_f = 100\ mm$ (ein moderater Wert innerhalb des zulässigen Grenzwerts von $130\ mm$) sowie einer Kurvenüberhöhung von $u = 150\ mm$ ergibt sich ein erforderlicher Kurvenmindestradius von $R = 300\ m$. Je nach Streckensituation kann die Höchstgeschwindigkeit und damit der erforderliche Radius jedoch beliebig angepasst werden.



Quelle: Eigene Darstellung. Datenquellen siehe Kapitel A1.

Abbildung 14 Projektierte Verbindungskurven als Infrastrukturausbauten zur Ermöglichung neuer Direktverbindungen.

Aus Zeitmangel wurden die Verbindungskurven in dieser Arbeit manuell in ArcGIS konstruiert. Grundsätzlich wäre jedoch auch eine automatische Einpassung solcher Kurven mithilfe geeigneter GIS-Werkzeuge und Algorithmik möglich.

4.5 Szenariogenerierung

4.5.1 Überblick

Die zukünftige Entwicklung der Umwelt, etwa das Bevölkerungswachstum und verändertes Mobilitätsverhalten, beeinflussen die Verkehrsnachfrage wesentlich, ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Um diese Unsicherheiten in die Bewertung der Ausbauvarianten einzubeziehen, wurden generative und explorative Szenarien eingesetzt, welche mögliche Entwicklungen des daraus resultierenden Nutzens abbilden.

Die in den Szenarien abgebildeten Umweltvariablen sind die Bevölkerungszahlen, der distanzmässige Modal-Split des öffentlichen Verkehrs sowie die täglich zurückgelegte Distanz pro Person. Es wurde für jede Variable ein Random-Walk-Modell verwendet, welches im Hintergrund die Entwicklung des Wachstumsindex modelliert, welcher bei 1 startet (Gleichung 1). Ein Index von 2 entspricht daher eine Verdoppelung. Technisch wurde das Modell mit Latin Hypercube Sampling (LHS) umgesetzt. Die Variablen werden jeweils vom Referenzjahr der Datenquelle in jährlichen Zeitschritten bis in das Jahr 2100 (Ende des Bewertungszeitraumes) modelliert. Die mathematische Formulierung des Random-Walk-Modell ist in Tabelle 2 dargestellt. So basiert der jährliche Entwicklungsschritt jeweils auf dem Wert des Vorjahres, einer Wachstumsrate (Gleichung 3) und der Summe von zufälligen, normalverteilten Schocks (Gleichung 2). Zusätzlich wächst die Standardabweichung der Wachstumsrate linear über die Jahre und besitzt einen klar definierten Start- und Endwert. Dadurch lässt sich genügend Variabilität in den Szenarien erzeugen, um die Spannbreite der möglichen zukünftigen Entwicklung abzubilden. Diese Methodik wurde teilweise von (Elvarsson u. a. 2025) übernommen.

$x_{t=0} = 1\ (1)$ $\varepsilon_t \sim N(0, \tau)\ (2)$ $g \sim N(\mu, \sigma)\ (3)$ $x_t = x_0 * \left(1 + g + \sum_{i=0}^{t} \varepsilon_i\right)\ (4)$	$\boldsymbol{x_t}$: Wert der Variable im Jahr t $\boldsymbol{x_{t=0}}$: Startwert (Index = 1) $\boldsymbol{g}$: jährliche Wachstumsrate mit konstantem Erwartungswert $\boldsymbol{\varepsilon_t}$: zufälliger Schock im Jahr t, normalverteilt $\boldsymbol{\mu}$: mittlere Wachstumsrate $\boldsymbol{\tau}$: Standardabweichung des Schocks $\boldsymbol{\sigma}$: Standardabweichung der Wachstumsrate

Tabelle 2 Mathematische Formulierung des Random-Walk-Modells für die Generierung der Zukunftsszenarien.

Für diese Arbeit wurden je 100 Szenarien pro Umweltvariable generiert und szenarienweise zu insgesamt 100 kombinierten Umweltszenarien zusammengeführt. Grundsätzlich wäre es im entwickelten Tool problemlos möglich, eine grössere Anzahl an Szenarien zu erzeugen oder die Szenarien der einzelnen Umweltvariablen auch untereinander zu kombinieren, um so die Vielfalt der Umweltszenarien weiter zu erhöhen. Aufgrund der Tatsache, dass die Rechenzeit der zeitaufwändigsten Module linear mit der Szenarienanzahl steigt, wurde in dieser die Anzahl auf 100 Szenarien begrenzt.

Im Folgenden werden nun die einzelnen modellierten Variablen im Detail besprochen.

4.5.2 Bevölkerung

Die Entwicklung der Bevölkerung wurde für jeden Bezirk des Kanton Zürichs individuell modelliert. Dadurch kann der Einfluss des Bevölkerungswachstum auf die Verkehrsnachfrage auch bezirksscharf berechnet werden, dies wird genauer in Kapitel 4.6.1 besprochen.

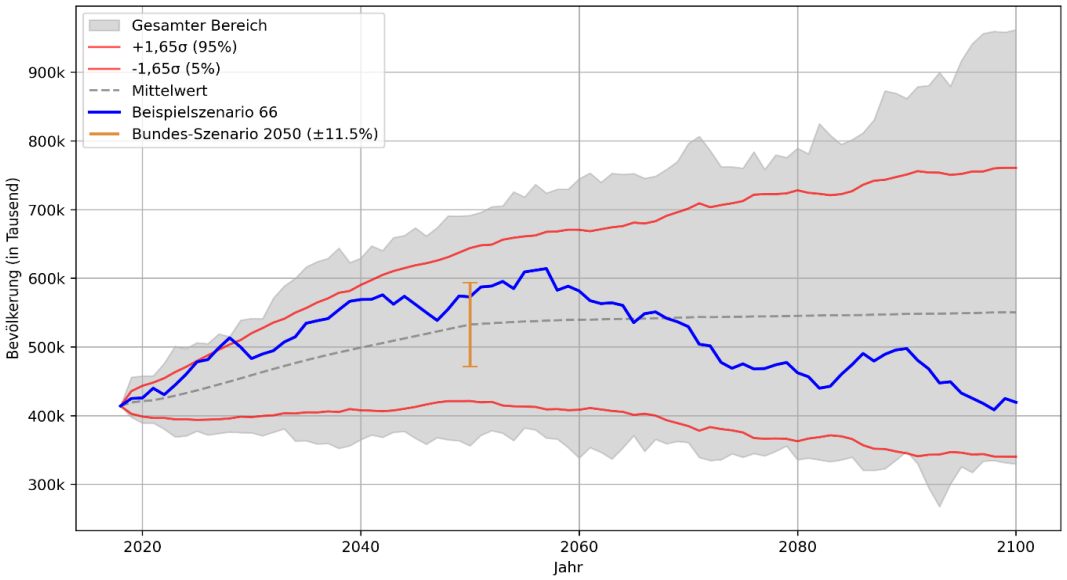
Für die Bevölkerungsentwicklung bis in das Jahr 2050 sind bezirksgenaue Daten vom Kanton Zürich verfügbar (Statistisches Amt Kanton Zürich 2025). Der gemessene Wert der Bevölkerung im Jahr 2018 wird als Startwert übernommen. Dies, da die Daten für die Verkehrsnachfrage auch aus diesem Jahr stammen. Bis 2050 wird jeweils für jedes Jahr und jeden Bezirk der Erwartungswert der Wachstumsrate aus den Bevölkerungsprognosen entnommen, jedoch bereits mit zufälligen Schocks und einer Standardabweichung überlagert.

Für die Prognose bis in das Jahr 2100 muss auf Prognosen auf nationaler Ebene zurückgegriffen werden: Die EU hat das Bevölkerungswachstum der Schweiz bis in das Jahr 2100 prognostiziert (Eurostat 2023). Damit die individuellen Eigenschaften der Bezirke auch in der Wachstumsrate im Zeitraum von 2050 bis 2100 abgebildet werden, wurde von 2018 bis 2050 ein Faktor errechnet, wie stark sich das Bezirkswachstum zu jenem der ganzen Schweiz unterscheidet. Dieser Faktor wird dann auf die Wachstumsprognosen der EU angewendet. So hat jeder Bezirk individuell angepasste Wachstumsraten. Für die Aussengebiete wurde jeweils die Wachstumsrate des angrenzenden Bezirks verwendet.

Die Standardabweichung der Wachstumsrate σ und der Schocks τ wurde so gewählt, dass das tiefe und hohe Bevölkerungsszenario des Bundes (± 11.5% des mittleren Szenarios) vollständig innerhalb der 90% zentralsten Werte der generierten Stichproben enthalten ist (Bundesamt für Statistik 2025a). Gewählt wurde $\sigma = 0.01$ im Jahr 2018 bis $\sigma = 0.03$ im Jahr 2100 und $\tau = 0.02$. In Abbildung 15 ist die gesamte Spannbreite der erzeugten Szenarien abgebildet.

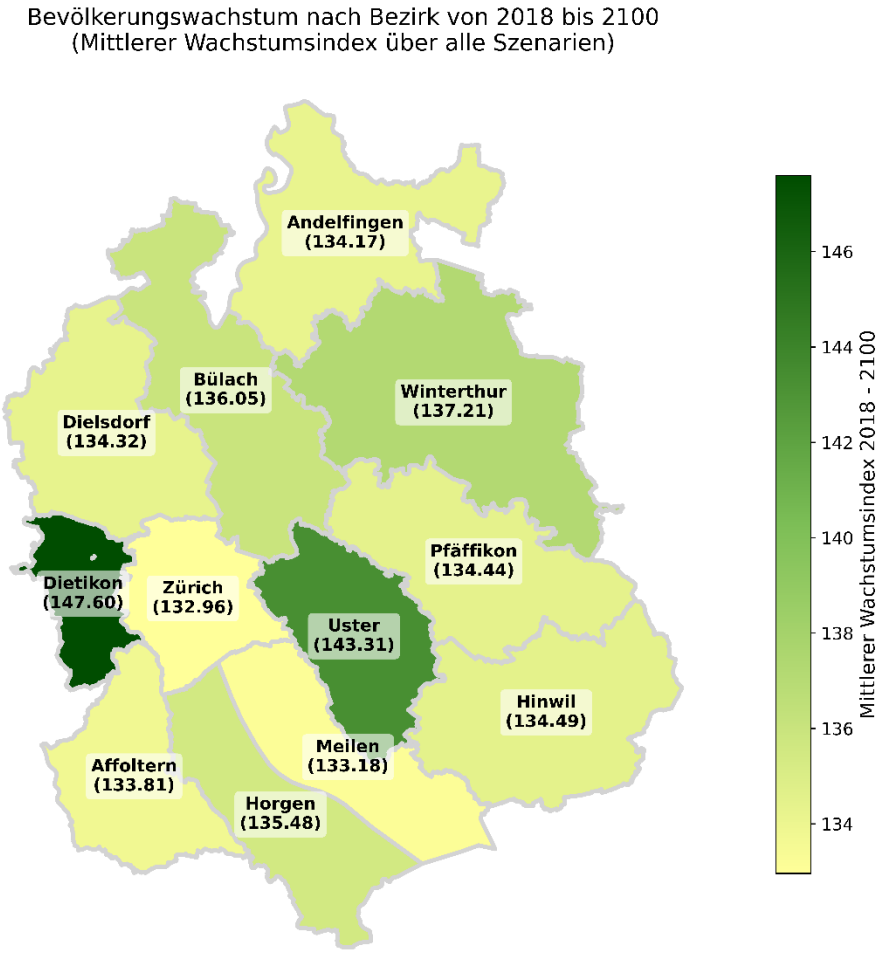
Bei den zentralsten 90% der generierten Werte (innerhalb der roten Linien) ist zu beachten, dass die 5%- und 95%- Grenze auf Basis der Standardabweichung berechnet wurden. Diese Annahme setzt eine Normalverteilung voraus. Da die Grenzen in allen Szenariodiagrammen nicht symmetrisch im gesamten Bereich liegen, ist ersichtlich, dass die generierten Szenariowerte keiner Normalverteilung mehr folgen. Die Verteilung ist nach oben verzerrt, was sich unter anderem dadurch erklären lässt, dass die LHS-Stichproben für die Wachstumsraten gezogen wurden. Grössere Ausgangswerte neigen dabei zu überproportionalem Wachstum, was die oberen Wertebereiche zusätzlich streckt.

Am Mittelwert der Szenarien lässt sich um das Jahr ein Knick erkennen, ab wo das Wachstum sich deutlich reduziert. An diesem Punkt wird die Datenquelle für die Wachstumsraten von den Bezirksszenarien des Kanton Zürich zur schweizweiten Prognose der EU gewechselt, welche besonders für die spätere Zukunft von deutlich abnehmenden Wachstumsraten ausgeht. Die räumliche Verteilung des Wachstums nach Bezirken ist in Abbildung 16 dargestellt. Insbesondere der Fallstudienkorridor besitzt ein vergleichsweise hohes Bevölkerungswachstum.



Quelle: Eigene Darstellung. Datenquellen siehe Kapitel A1.

Abbildung 15 Generierte Bevölkerungsszenarien für den Bezirk Zürich. Der zentrale Wahrscheinlichkeitsbereich mit 90% der typischsten Werte ist rot eingegrenzt. Die blaue Kurve zeigt eines der 100 erzeugten Szenarios.



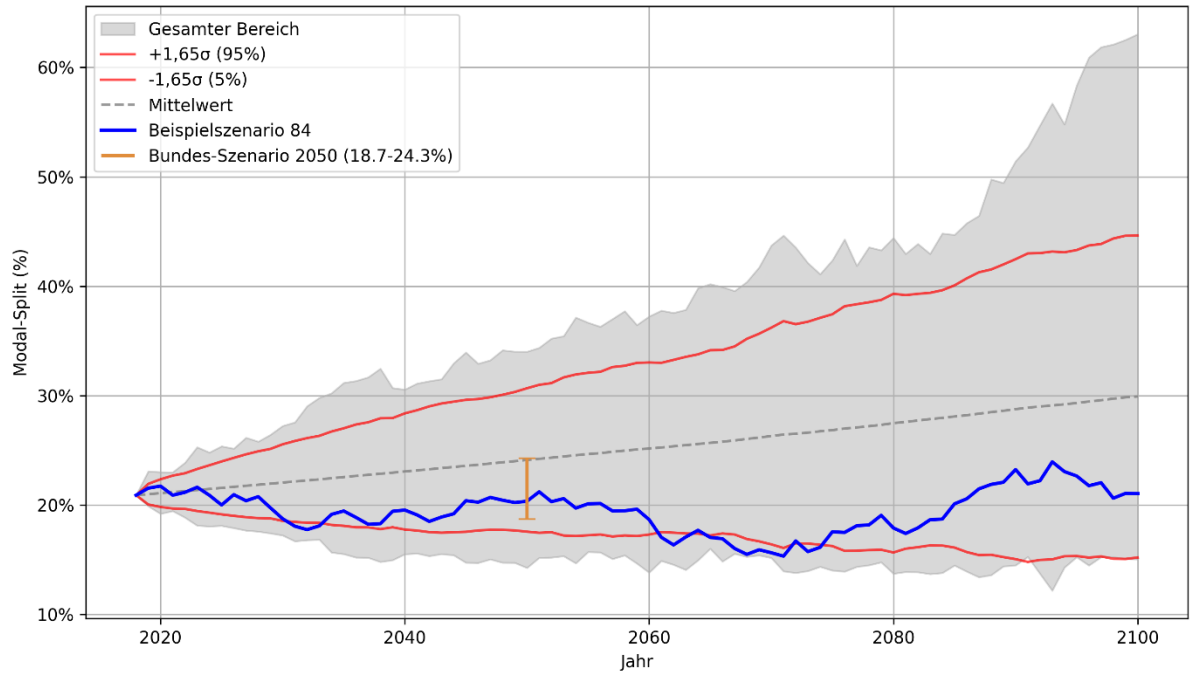
Quelle: Eigene Darstellung. Datenquellen siehe Kapitel A1.

Abbildung 16 Wachstumsindex der einzelnen Bezirke von 2018 bis 2100 über alle Szenarien hinweg.

4.5.3 Modal Split ÖV

Für die Entwicklung des distanzmässigen Modal-Splits des öffentlichen Verkehrs wurde auf Daten der Verkehrsperspektiven 2050 des Bundesamt für Raumentwicklung zurückgegriffen (Bundesamt für Raumentwicklung ARE 2022). Es muss jedoch beachtet werden, dass die dort entwickelten Szenarien normative Szenarien sind und daher an politische und umweltbezogene Ziele geknüpft sind. Die Erreichung der Szenarien erfordert die Umsetzung vordefinierter Entwicklungen und Massnahmen (vgl. Kapitel 2.4.2). Sie bilden jedoch nicht die ganze Spannbreite der zukünftigen Entwicklung ab und müssen daher mit Vorsicht zur Generierung verwendet werden. Daher wurde nur die mittlere Wachstumsrate und der Startwert (2018) vom Referenzszenario «Basis» übernommen. Die Wachstumsrate wurde konstant bis in das Jahr 2100 gewählt. Die Standardabweichungen der Wachstumsrate σ und der Schocks τ wurde so gewählt, dass alle Szenarien der Verkehrsperspektive vollständig innerhalb der 90% zentralsten Werte der generierten Stichproben enthalten sind. Gewählt wurde $\sigma = 0.015$ im Jahr 2018 bis $\sigma = 0.045$ im Jahr 2100 und $\tau = 0.02$. Die gesamte Spannbreite der generierten Szenarien ist in Abbildung 17 dargestellt. Innerhalb der generieten Szenarien ist so eine Zu- oder Abnahme des Modal Splits möglich. Anhand des Mittelwertes wird eine Zunahme des distanzmässigen Modal Splits im ÖV auf 30% im Jahr 2100 prognostiziert. Die Spannbreite der Szenarien der Verkehrsperspektiven erstreckt sich nur nach unten vom Mittelwert aus, da das

verwendete Referenzszenario «Basis» auch das optimistischste war. Der prognostizierte Modal-Split des ÖV gilt schweizweit und wird daher auf alle Bezirke gleichermassen angewendet.

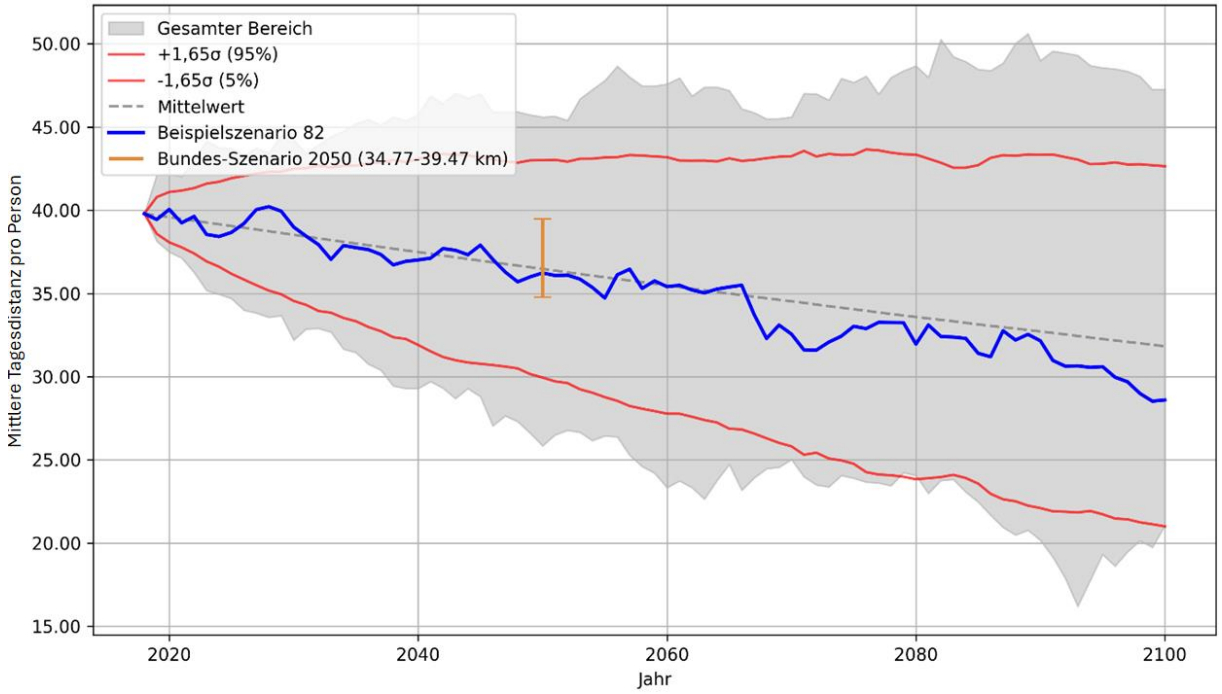


Quelle: Eigene Darstellung. Datenquellen siehe Kapitel A1.

Abbildung 17 Generierte ÖV Modal-Split Szenarien für die Schweiz. Der zentrale Wahrscheinlichkeitsbereich mit 90% der typischsten Werte ist rot eingegrenzt. Die blaue Kurve zeigt eines der 100 erzeugten Szenarios.

4.5.4 Durchschnittliche Tagesdistanz

Auch für die mittlere zurückgelegte Tagesdistanz pro Person (über alle Verkehrsmittel) wurden die Daten der Verkehrsperspektiven 2050 verwendet (Bundesamt für Raumentwicklung ARE 2022). Es wurde ebenfalls die mittlere Wachstumsrate und der Startwert (2018) vom Referenzszenario «Basis» übernommen. Die Wachstumsrate wurde konstant bis in das Jahr 2100 gewählt Die Standardabweichungen der Wachstumsrate σ und der Schocks τ wurde so gewählt, dass alle Szenarien der Verkehrsperspektive vollständig innerhalb der 90% zentralsten Werte der generierten Stichproben enthalten sind. Gewählt wurde $\sigma = 0.005$ im Jahr 2018 bis $\sigma = 0.015$ im Jahr 2100 und $\tau = 0.015$. Die gesamte Spannbreite der generierten Szenarien ist in Abbildung 18 dargestellt. Innerhalb der generierten Szenarien ist so eine Zu- oder Abnahme der mittleren Tagesdistanz möglich. Anhand des Mittelwertes wird eine Abnahme der Tagesdistanz auf circa 32 km pro Tag im Jahr 2100 prognostiziert. Die prognostizierte mittlere Tagesdistanz gilt schweizweit und wird daher auf alle Bezirke gleichermassen angewendet.



Quelle: Eigene Darstellung. Datenquellen siehe Kapitel A1.

Abbildung 18 Generierte Szenarien für die zurückgelegte, mittlere Tagesdistanz pro Person in der Schweiz. Der zentrale Wahrscheinlichkeitsbereich mit 90% der typischsten Werte ist rot eingegrenzt. Die blaue Kurve zeigt eines der 100 erzeugten Szenarios.

4.6 Modellierung Verkehrsnachfrage

4.6.1 Berechnung Nachfrage

Als Grundlagen für die Verkehrsnachfrage wurde eine Quell-Ziel-Matrix des Zürcher Gesamtverkehrsmodells (GVM-ZH) verwendet (Amt für Mobilität Kanton Zürich 2025). Die Matrix enthält die Anzahl Wege zwischen den einzelnen Gemeinden des Kantons Zürich an einem durchschnittlichen Werktag (DWV) im Jahr 2018. Die Gebiete ausserhalb des Kanton Zürichs sind als grössere Verkehrszonen abgebildet und weisen daher eine geringere räumliche Auflösung auf. Zudem ist für jede Relation auch der ÖV-Anteil erfasst, wodurch eine reine ÖV-Nachfragematrix vorliegt.

Auf Basis dieser Matrix und der Wachstumsindizes aus den Szenarien lässt sich die Verkehrsnachfrage für jedes Jahr und jedes Szenario berechnen. Die globalen Variablen Modal-Split und durchschnittliche Tagesdistanz werden dabei als Faktoren auf die gesamte Matrix angewendet. Das bezirksspezifische Bevölkerungswachstum wird selektiv auf die einzelnen Gemeinden angewendet.

Es wird angenommen, dass sich die Verkehrsnachfrage zwischen den Gemeinden linear zum Bevölkerungswachstum verhält. Da eine Verkehrsnachfrage immer zwischen zwei potentiell unterschiedlichen Gemeinden und damit auch Bezirken besteht, werden jeweils sowohl Zeile (Quelle) als auch Spalte (Ziel) der Matrix mit dem Index des Bevölkerungswachstums in der Wurzel multipliziert. Die Berechnung der Verkehrsnachfrage für die Szenarien ist im Folgenden mathematisch genauer definiert:

$q_{rs,t,j} = q_pop_{rs,t,j} * MS_{t,j} * d_{t,j}$ $q_pop_{rs,t,j} = \sqrt{pop_{r,t,j}} * \sqrt{pop_{s,t,j}} * q_{rs,0,0}$ $t \in \{2018,2019, \dots ,2100\}$ $j \in \{1,2, \dots ,100\}$	$q_{rs,t,j}$: Verkehrsnachfrage zwischen Gemeinde r und s für Szenario j und Jahr t $MS_{t,j}$: Modal-Split Index ÖV für Szenario j und Jahr t $d_{t,j}$: Index der durchschnittlichen Tagesdistanz für Szenario j und Jahr t $pop_{u,t,j}$: Index der Bevölkerungsentwicklung im Bezirk der Gemeinde u für Szenario j und Jahr t $q_pop_{rs,t,j}$: Skalierte Verkehrsnachfrage (anhand Bevölkerungswachstum) zwischen Gemeinde r und s für Szenario j und Jahr t $q_{rs,0,0}$: Verkehrsnachfrage zwischen Gemeinde r und s aus der Quell-Ziel-Matrix des Kantons Zürich.

Tabelle 3 Mathematische Definition der Berechnung der Verkehrsnachfrage zwischen allen Verkehrszonen/ Gemeinden für alle Jahre und Szenarien.

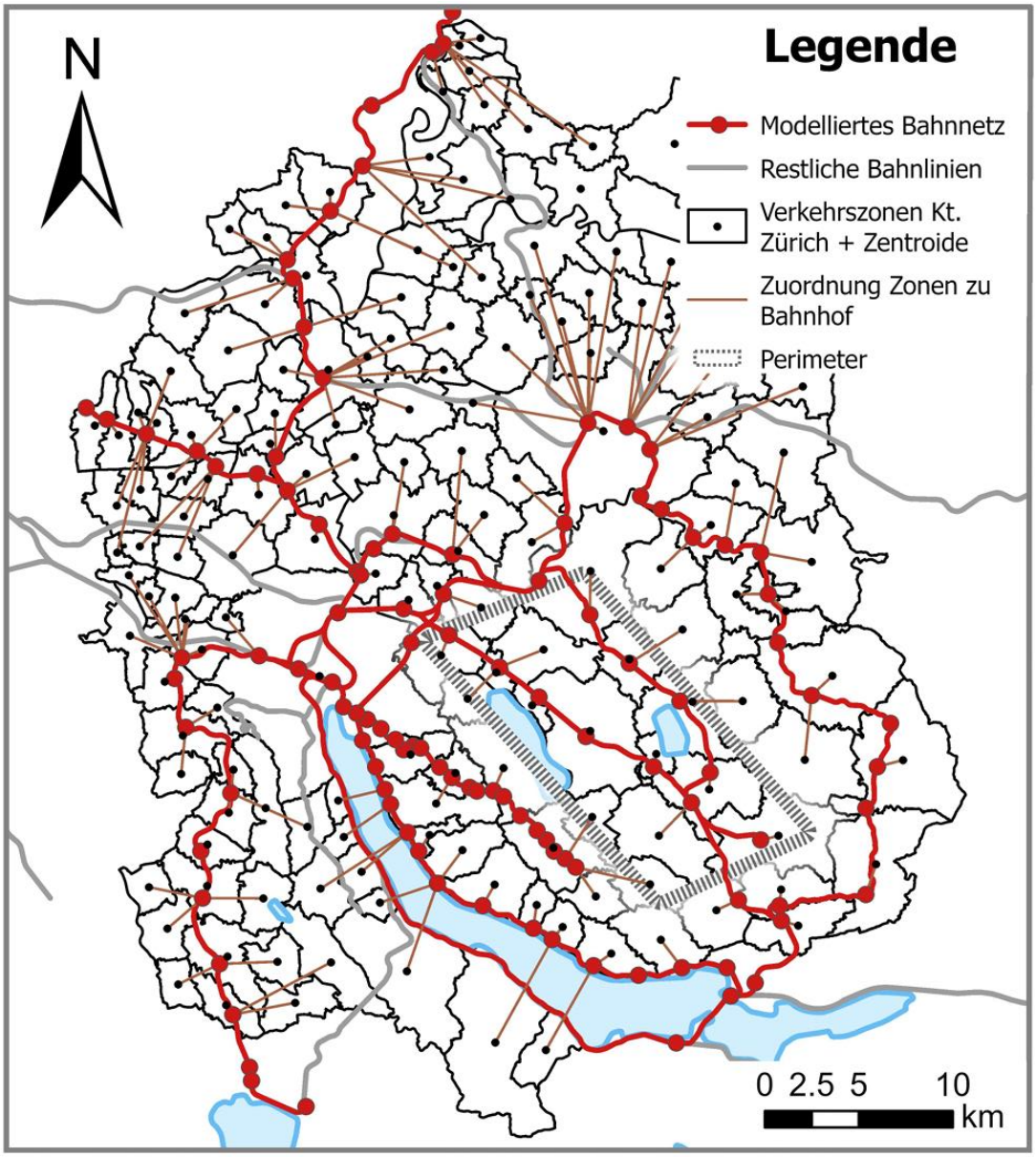
4.6.2 Umlegung der Nachfrage auf das Bahnnetz

Die Verkehrsnachfrage der kontinuierlichen Umwelt muss nun dem diskreten Bahnnetz zugeordnet werden. Dafür wurde jeweils die Zentroide jeder Verkehrszone (in diesem Fall die Gemeindepolygone) anhand der Luftliniendistanz dem nächstgelegenen Bahnhof im modellierten Bahnnetz zugeordnet. Dies unter Einhaltung einer maximalen Zuordnungsdistanz. Die wenigen Aussengebiete des Verkehrsmodells wurden manuell mit grösseren Knotenbahnhöfen verknüpft, darunter beispielsweise Winterthur, Zürich Altstetten und Rapperswil. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Dimensionen der Quell-Ziel-Matrix ändern sich daher von $N \; x \; N$ Verkehrszonen auf $M \; x \; M$ Bahnhöfe.

Der wesentliche Vorteil dieses Vorgehens ist die einfache Umsetzung und die gute Skalierbarkeit auf beliebige Fallstudiengebiete. Die vereinfachte Zuordnung einer ganzen Gemeinde auf den jeweils geografisch nächsten Bahnhof bringt jedoch auch Fehlerquellen hervor: Verfügt eine Gemeinde über mehrere Bahnhöfe – wie etwa die Stadt Zürich – wird die gesamte Nachfrage lediglich jenem Bahnhof zugewiesen, welcher der Zentroide am nächsten liegt. In der Realität würde sich diese Nachfrage auf mehrere Stationen verteilen. So wurde im konkreten Fall die gesamte Nachfrage der Stadt Zürich dem Hauptbahnhof zugeordnet.

Des Weiteren entspricht die geografische Distanz nicht zwingend der tatsächlichen Reisezeit mit einem Zubringerverkehrsmittel wie Bus oder Tram. Aufgrund der Struktur des regionalen ÖV-Netzes kann es daher zu systematischen Fehlzuweisungen kommen – oder Fahrgäste wählen bewusst einen weiter entfernten Bahnhof, wenn dieser eine deutlich bessere Anbindung bietet. So wird beispielsweise die Gemeinde Grüningen dem Bahnhof Esslingen (Forchbahn) zugeordnet, obwohl die Verbindung nach Zürich in vielen Fällen über Wetzikon schneller verlaufen würde.

Insgesamt betrifft diese Problematik jedoch nur einen kleinen Teil der Bevölkerung bzw. der Nachfrage. Die daraus resultierenden Effekte auf die Reiserouten im Bahnnetz bleiben meist lokal begrenzt – zumal die Bahn insbesondere für längere Distanzen genutzt wird. Zudem gleichen sich einzelne Ungenauigkeiten potenziell gegenseitig aus. Unter diesen Bedingungen erscheint die gewählte Zuordnungsmethodik für die vorliegende Fallstudie als vertretbar, muss jedoch bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.



Quelle: Eigene Darstellung. Datenquellen siehe Kapitel A1.

Abbildung 19 Zuordnung der Verkehrszonen (meist Gemeinden) innerhalb des Kantons Zürich zum nächstgelegenen Bahnhof (Luftlinie) des modellierten Bahnnetzes.

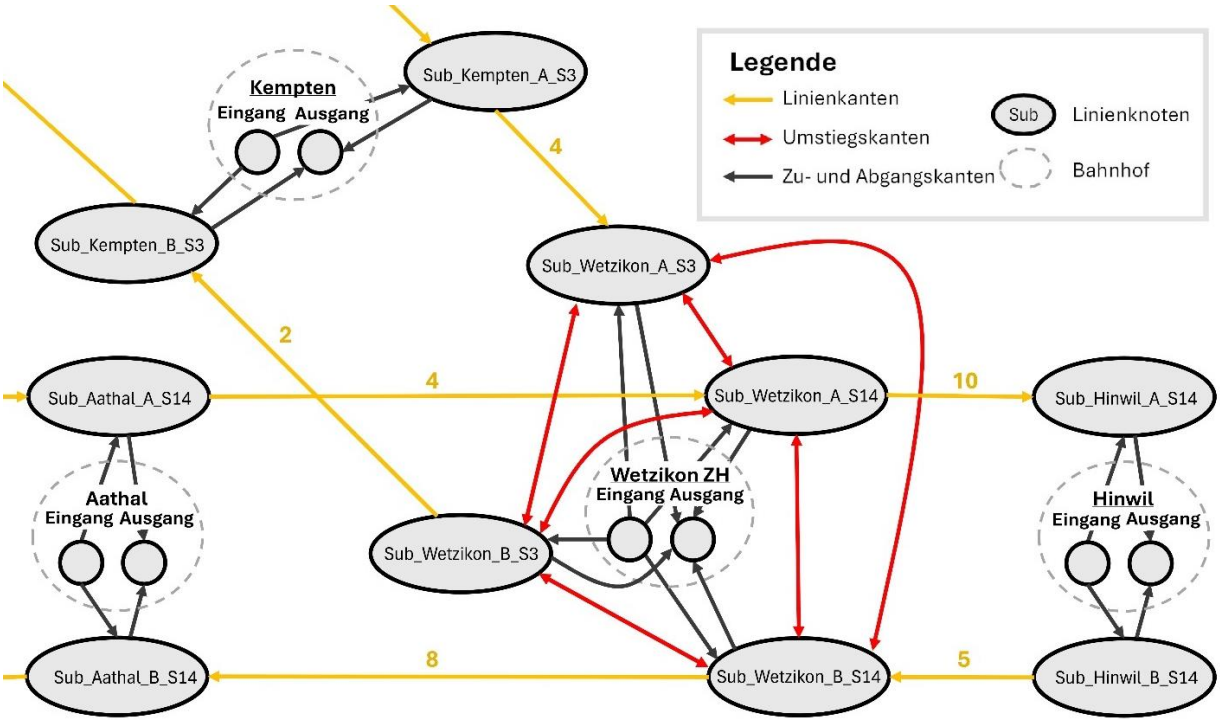
In der Arbeit von (Röthlisberger 2024) wurden die Einzugsgebiete der Bahnhöfe aufgrund des Busnetzes der Region berechnet. Dies stellt einen räumlich genaueren Ansatz dar als das Zuordnen der ganzen Gemeinde zu einem Bahnhof. Da der Ansatz bislang jedoch nur für den Fallstudienkorridor selbst funktionierte und so sämtliche Nachfrage nach Zürich und Winterthur ignorierte und schwierig auf grössere Gebiete erweiterbar ist, wurde der Ansatz in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Er könnte in zukünftigen Arbeiten wiederaufgenommen werden.

4.7 Reisezeitberechnung und Wegfindung

Zur Berechnung der Reisezeiten und der Routenwahl im Bahnnetz – sowohl für den Referenzzustand als auch für die neu generierten Ausbauten – wird das Bahnangebot als Graph modelliert. Dieser wurde mithilfe des Python-Moduls NetworkX auf Basis von Knoten- und Kantenlisten aufgebaut. Die bestehende Funktionsbibliothek erlaubt es, auf dem Netz effizient die kürzesten Wege zu bestimmen (Hagberg u. a. 2008). Alle Verkehrsströme zwischen den Bahnhöfen wählen auf dem Netz den kürzesten Pfad.

Abbildung 20 zeigt den Aufbau des Graphen für die Reisezeitberechnung. Er wurde so konzipiert, dass darin sowohl der Betrieb der Linien als auch die detaillierten Reisewege der Fahrgäste darin abgebildet werden können. Die Kantengewichte entsprechen daher jeweils der benötigten Zeit für eine Aktivität. Der Graph umfasst folgende Elemente:

- **Linienkanten**: Bilden den Fahrverlauf der Linien ab. Zugehörige Halte- und Fahrzeiten zwischen zwei Stationen wurden jeweils zu einer Kante zusammengefasst.
- **Umstiegskanten**: Repräsentieren die Zeit, die für den Wechsel zwischen zwei Zügen benötigt wird.
- **Zu- und Abgangskanten**: Modellieren das Betreten oder Verlassen eines Bahnhofs am Anfang und Ende des gesamten Reisewegs auf dem Bahnnetz.
- **Linienknoten**: Abbildungen des Bahnhofs aus betrieblicher Sicht; für jede S-Bahn und Fahrtrichtung existiert ein separater Knoten.
- **Bahnhöfe**: Bahnhof aus Fahrgastsicht. Er besitzt jeweils einen getrennten Ein- und Ausgang.



Quelle: Adaptiert von (Röthlisberger 2024).

Abbildung 20 Graphenbasierte Darstellung des Bahnnetzes zur Modellierung der Reisezeiten aus Sicht der Fahrgäste.

Obwohl Ein- und Ausgang eines Bahnhofs physisch dasselbe Element darstellen, müssen sie im Graphen topologisch getrennt werden. Andernfalls könnten Umsteigevorgänge fälschlicherweise über Zu- oder Abgangskanten abgekürzt werden und so die eigentliche Umsteigezeit umgehen. Durch diese Trennung lassen sich die Zugangs-, Abgangs- und Umsteigezeiten unabhängig voneinander definieren. Für diese Arbeit wurde eine konstante Zugangs- und Abgangszeit von 3 Minuten gewählt. Für den Umstieg wurde gemäss (Axhausen u. a. 2014) ein Pauschalwert von 7.1 Minuten gewählt. Zusätzlich muss diese Zeit noch mit einem Faktor von 1.7 gewichtet werden, da die Umsteigezeit für den Fahrgast subjektiv deutlich aufwändiger ist, als die Reisezeit in einem Fahrzeug. Daraus ergibt sich eine komfortgewichtete Umsteigezeit von $7.1\ min * 1.7 = 12.1\ min$.

Die Sub-Knoten der Linien könnten pro Bahnhof in der aktuellen Implementierung grundsätzlich zusammengefasst werden. Sie wurden jedoch bewusst getrennt beibehalten, um den betrieblichen Ablauf präziser abzubilden und die Flexibilität des Graphen für künftige Erweiterungen zu erhalten. Einen Teil der Graphenstruktur konnte bereits von (Röthlisberger 2024) übernommen werden, insbesondere der topologische Aufbau der Bahnhöfe wurde jedoch grundlegend überarbeitet.

Aktuell berücksichtigt das Modell noch nicht die Taktfrequenz einzelner Verbindungen bei der Berechnung von Zugangs- oder Umsteigezeiten. In einer zukünftigen Weiterentwicklung wäre es denkbar, diese Zeiten frequenzabhängig zu modellieren. Dadurch würde die Anpassungszeit des Fahrgasts an den Fahrplan der Linien modelliert werden. Dafür müssten jedoch mehrere kürzeste Pfade zwischen zwei Bahnhöfen identifiziert werden, um die effektive Fahrplanfrequenz zu bestimmen – insbesondere in Netzabschnitten, auf denen sich mehrere Linien überlagern. So ergeben etwa die S5 und S15 auf dem Abschnitt Zürich–Rapperswil gemeinsam einen 15-Minuten-Takt, obwohl jede Linie einzeln nur alle 30 Minuten verkehrt.

Die Berechnung der Reisezeiten und die Wegfindung im Graphen ermöglichen auch die Ermittlung der Verkehrsströme auf den einzelnen Strecken und Linien. Dies erlaubt einerseits ein besseres Verständnis der Netznutzung und zeigt andererseits auf, wie ein neuer Angebotsausbau von den Fahrgästen tatsächlich genutzt wird. Die berechneten Verkehrsströme auf dem Netz werden bei den Resultaten in Kapitel 5.1 präsentiert.

4.8 Bewertung

In der Bewertung der generierten Angebots- und Infrastrukturausbauten muss abgebildet werden, wie gut die Bedürfnisse der verschiedenen Stakeholder erfüllt werden. Eine ganzheitliche Betrachtung aus Sicht aller relevanten Akteursgruppen ist zentral, um fundierte und objektiv nachvollziehbare Entscheidungen treffen zu können – und um den gesamtgesellschaftlichen Nutzen zu maximieren. Im folgenden Kapitel 4.8.1 werden die Stakeholdergruppen identifiziert, die von einem Ausbau des Bahnnetzes betroffen sind, sowie die jeweils relevanten Bedürfnisse beschrieben.

4.8.1 Stakeholder und ihre Interessen

Die Akteure im Kontext des Bahnnetzes und dessen Ausbaus lassen sich unterteilen in die Stakeholder-Gruppen Eigentümer, Nutzer sowie die direkt und die indirekt betroffene Öffentlichkeit, wie in Tabelle 4 dargestellt (Papathanasiou u. a. 2019). Die jeweils relevanten Bedürfnisse sind in Form von bewertbaren Kostenkomponenten ebenfalls in der Tabelle aufgeführt.

Stakeholder	Akteur	Kostenkomponente
Eigentümer	*Finanziert* durch Bund *Ausgeführt* durch Infrastrukturbetreiber (ISB): SBB Infrastruktur	Baukosten (min) Unterhaltskosten (min)
Nutzer	*Finanziert* durch Bund und Kantone *Ausgeführt* durch Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU): SBB Personenverkehr	Betriebskosten (min) Ertrag Fahrausweise (max) Kapazität Bahnnetz (max)
	Dienstleistungsnutzender: Fahrgast	Zugangszeit (min) Reisezeitverkürzung (max) Frequenz (max) Komfort (max)
Betroffene Öffentlichkeit	Direkt betroffene Öffentlichkeit (DBO): z.B. Anwohner	Landschaftszerschneidung (min)
	Indirekt betroffene Öffentlichkeit (IBO): ganze Bevölkerung	Flächenverbrauch (min) Emissionen durch Verkehr (alle Verkehrsmittel) (min) Klimawandel (min)

Tabelle 4 Definition der relevanten Stakeholder und der zugeordneten Kostenkomponenten. Angepasst von (Papathanasiou u. a. 2019)

Im Folgenden werden die einzelnen Stakeholder und ihre Bedürfnisse genauer beschrieben:

Der **Eigentümer** ist der Infrastrukturbetreiber (ISB) und ist verantwortlich für Finanzierung, Unterhalt und die Bereitstellung eines funktionierenden Schienennetzes. Der grösste ISB der Schweiz ist die Division SBB Infrastruktur. Ihre Hauptanliegen zusammen mit dem Bund sind der effiziente Einsatz öffentlicher Mittel, die Einhaltung von Umwelt- und Sicherheitsstandards sowie die langfristige Nachhaltigkeit der Infrastruktur. Zudem wird eine hohe Verfügbarkeit der angebotenen Fahrtrassen angestrebt.

Die **Nutzer** der Bahninfrastruktur lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Die **direkten Nutzer** sind die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), welche für den Betrieb der eigentlichen Zugleistungen verantwortlich sind. Das grösste EVU der Schweiz ist die Division SBB Personenverkehr. Sie sind interessiert an einem kosteneffizienten, zuverlässigen und sicheren Betrieb sowie an einer hohen Auslastung der Züge. Ausreichende Netzkapazitäten und attraktive Trassen sind eine zentrale Voraussetzung dafür. Die **Dienstleistungsnutzenden** sind die Fahrgäste. Sie sind an möglichst schnellen, häufigen, komfortablen, zuverlässigen und günstigen Verbindungen interessiert. Viele dieser Qualitätsmerkmale hängen direkt von der zugrunde liegenden Infrastruktur und deren Kapazität ab.

Die **direkt betroffene Öffentlichkeit (DBO)**, umfasst Personen und Organisationen, die in unmittelbarer räumlicher Nähe zur neuen Infrastruktur leben oder wirtschaften, diese aber nicht selbst nutzen. Dazu gehören beispielsweise Anwohnende, die durch Lärm oder visuelle Eingriffe betroffen sind, oder Landwirte, deren Nutzflächen durch bestimmte Ausbauvarianten beeinträchtigt werden.

Die **indirekt betroffene Öffentlichkeit (IBO)** umfasst Personen und Organisationen, welche die Infrastruktur nicht selbst nutzen und auch nicht in unmittelbarer Nähe dazu leben, jedoch dennoch von ihren Auswirkungen betroffen sind. Dazu zählen beispielsweise Veränderungen der Flächennutzung oder die wirtschaftliche Entwicklung infolge verbesserter verkehrlicher Erreichbarkeit. Auch globale Auswirkungen im Kontext des Klimawandels sind relevant, etwa durch Emissionsreduktionen infolge einer Verlagerung des Verkehrs vom MIV auf die Bahn.

4.8.2 Bewertungsfunktion

Die in Tabelle 4 dargestellten Bedürfnisse und zugehörigen Kostenkomponenten der Stakeholder müssen nun in einer gemeinsamen Bewertungsfunktion zusammengeführt werden. Grundsätzlich lässt sich jede Kostenkomponente einem Haupt-Stakeholder zuordnen – dabei ist jedoch sicherzustellen, dass kein Bedürfnis doppelt gewichtet wird. Zudem müssen alle berücksichtigten Bedürfnisse monetarisierbar sein und auf geeigneten, verfügbaren Daten basieren.

Tabelle 5 zeigt, welche Kostenkomponenten für diese Fallstudie tatsächlich modelliert und berechnet wurden. Auch wird erklärt, weshalb bestimmte in Kapitel 4.8.1 identifizierte Bedürfnisse, nicht in die Bewertungsfunktion aufgenommen werden konnten.

Stakeholder	Kostenkomponente	Integriert?	Bemerkung
Eigentümer	Baukosten	JA	
	Unterhaltskosten	JA	Es werden die resultierenden, ungedeckten Unterhaltskosten berechnet, welche vom Bund finanziert werden müssen.
Nutzer	Betriebskosten	JA	Es werden die ungedeckten Betriebskosten errechnet, welche von Bund und Kantonen finanziert werden müssen.
	Ertrag Fahrausweise	JA	
	Ausreichende Netzkapazität	NEIN	Müsste zusammen mit Frequenz in der Bewertung eingeführt werden.
Dienstleistungs-nutzer	Zugangszeit	NEIN	Nicht berücksichtigt, verbleibt ohne zusätzliche Bahnhöfe unverändert.
	Reisezeitverkürzung	JA	
	Komfort	TEILWEISE	Komfortgewichtung bei Umstiegszeiten beachtet.
	Frequenz	NEIN	Technisch noch nicht in der Wegfindung implementiert. Künftig möglich und sinnvoll.
DBO	Landschaftszerschneidung	NEIN	Künftige Einbeziehung sinnvoll.
	Flächenverbrauch	NEIN	Künftige Einbeziehung sinnvoll.
	Verkehrsemissionen (alle Verkehrsmittel)	NEIN	Schwer zu quantifizieren: Umfasst sowohl Emissionssteigerung von Bahn sowie Emissionsminderung für MIV durch Verkehrsverlagerung.
IBO	Klimawandel	NEIN	Schwer zu quantifizieren; künftige Einbeziehung sinnvoll.

Tabelle 5 Berücksichtigte Kostenkomponenten der Stakeholder in der Bewertungsfunktion und Begründung für den Einbezug bzw. Ausschluss.

Die berücksichtigten Kostenkomponenten treten zu verschiedenen Zeitpunkten auf: Während beispielsweise die Baukosten in einem kürzeren Zeitraum vor der Inbetriebnahme anfallen, entstehen die Unterhaltskosten jährlich danach über den ganzen Nutzungszeitraum hinweg. Um diesen zeitlichen Unterschieden gerecht zu werden, wurden sämtliche Kostenkomponenten für jedes Jahr einzeln berechnet und zu einem jährlichen Gesamtkostenwert $K_{ij,t}^{total}$ zusammengefasst.

Die jährlichen Gesamtkosten wurden diskontiert auf eine Preisbasis des Jahres 2050 übertragen – entsprechend dem angenommenen Zeitpunkt der Inbetriebnahme eines neuen Angebots- oder Infrastrukturausbaus. Anschliessend wurden die Kosten über den Bewertungszeitraum von 2050 bis

2100 aufsummiert. Die mathematische Formulierung der Bewertungsfunktion ist in Tabelle 6 genauer dargestellt.

$K_{ij,t}^{total} = K_{i,t}^{Bau} + K_{i,t}^{\substack{Unterhalt,\\ ungedeckt}} + K_{ij,t}^{\substack{Betrieb,\\ ungedeckt}} + K_{ij,t}^{Reisezeit}$ $K_{ij}^{total} = \sum_{t=2050}^{2100} Diskont.\left(3\%, t = 2050, K_{ij,t}^{total}\right)$ $N_{ij}^{Netto} = K_{0,j}^{total} - K_{ij}^{total}$	$Diskont.()$: Diskontierungsfunktion mit Zinssatz 3% und Preisbasis 2050 $K_{ij,t}^{total}$: Gesamtkosten der Infrastrukturentwicklung i im Szenario j, für das Jahr t K_{ij}^{total}: Diskontierte Gesamtkosten der Infrastrukturentwicklung i im Szenario j für den gesamten Bewertungszeitraum $K_{0,j}^{total}$: Totale Kosten für den Status quo im Szenario j N_{ij}^{Netto}: Nettonutzen, gesamter Bewertungszeitraum

Tabelle 6 Mathematische Formulierung der Bewertungsfunktion: Aggregation und Diskontierung der Kostenkomponenten

Die monetären Werte der Kostenkomponenten K sind alle positiv. Ihre Höhe hängt – je nach Komponente – von der jeweiligen Infrastrukturentwicklung i und dem Szenario j ab. Der Nettonutzen N_{ij}^{Netto} ergibt sich durch den Vergleich der gesamten Kosten einer Infrastrukturentwicklung K_{ij}^{total} mit den Kosten des Referenzzustand $K_{0,j}^{total}$.

Der abschliessende bewertete Nettonutzen ist jedoch kein einzelner Wert, sondern liegt als Datensatz mit einem N_{ij}^{Netto} für jedes Szenario j vor. In den folgenden Kapiteln werden nun die einzelnen Kostenkomponenten im Detail beschrieben.

4.8.3 Baukosten

Baukosten werden benötigt, um einen Infrastruktur zu realisieren. Sie fallen vollständig vor der Inbetriebnahme des Ausbaus an. In dieser Arbeit wird die Berechnung der Baukosten für Linienverlängerungen und Korridorverbindungen unterschiedlich durchgeführt, was auf die historische Entwicklung des Projekts zurückzuführen ist.

Für die Verlängerung von Linien um eine Station wurde die Baukostenberechnung bereits von (Röthlisberger 2024) implementiert und wird hier in verkürzter Form wiedergegeben: Die bestehende Infrastruktur entlang der betroffenen Streckenabschnitte wurde manuell anhand räumlicher Daten erfasst. Erhoben wurden insbesondere die Anzahl der Gleise sowie die Längen ein- und mehrgleisiger Abschnitte, Tunnel und Brücken. Zusätzlich wurde die Kapazitätsauslastung nach der Erweiterung berechnet, indem die Anzahl Züge pro Stunde und Richtung ermittelt wurde. Überschritt die neue Auslastung die definierte maximale Belegung von acht Zügen pro Gleis und Stunde, wurde eine eingleisige Strecke durch ein zweites Gleis ergänzt. Die eigentliche Berechnung der Baukosten erfolgte durch Multiplikation der Länge der auszubauenden Elemente mit den entsprechenden Einheitspreisen, wobei die Summierung über alle relevanten Infrastrukturtypen hinweg erfolgte (vgl. Gleichung 4).

War für die Verbindung zweier Korridore die Projektierung einer neuen Verbindungskurve erforderlich, so wurden auch dafür die Baukosten berechnet. Die entsprechenden Längen der neu zu errichtenden Tunnel, Brücken und Gleise ohne Kunstbauten sind aus der im Kapitel 4.4.5 beschriebenen Projektierung bekannt. Auch hier wurden die einzelnen Längen mit den jeweiligen Einheitspreisen

multipliziert und zu den gesamten Baukosten aggregiert (siehe Tabelle 7). Für die Kostenschätzung wurden geeignete Referenzprojekte herangezogen, aus denen die Einheitspreise pro Längeneinheit übernommen wurden. Eine Übersicht dieser Referenzprojekte und der abgeleiteten Einheitspreise ist in Tabelle 8 aufgeführt.

$K_i^{Bau} = \sum_{a=1}^{n} L_a * EP_a$	K_i^{Bau}: Baukosten für Infrastrukturentwicklung i L_a: Länge von Element a. (Gleis, Tunnel, Brücke) in Meter. EP_a: Einheitskosten für den Bau von Element a pro Meter (abhängig vom Typ: Gleis, Tunnel, Brücke).

Tabelle 7 Berechnung der Baukosten für eine Infrastrukturentwicklungen.

Element	Projekt	Einheitspreis	Quelle
Tunnel	Zimmerberg-Basistunnel I	87’362 CHF/m	(Bosshard und Matter 2000)
	Zimmerberg-Basistunnel II	70’000 CHF/m	(SBB 2025b)
	Ceneri-Basistunnel	155’844 CHF/m	(Ceriani 2015)
	Geschätzter Einheitspreis	**104’000 CHF/m**	
Gleis ohne Kunstbauten	Grellingen–Duggingen	33’250 CHF/m	(SBB 2025a)
	Geschätzter Einheitspreis	**33’250 CHF/m**	
Brücke	Hinterrheinbrücke Reichenau	70’000 CHF/m	(Rhätische Bahn 2018)
	Geschätzter Einheitspreis	**70’000 CHF/m**	

Tabelle 8 Einheitspreise pro Infrastrukturelement auf Basis vergleichbarer Referenzprojekte.

4.8.4 Ungedeckte Unterhaltskosten

Die Unterhaltskosten sind alle laufenden Ausgaben, die für den Substanzerhalt der Infrastruktur notwendig sind. Dazu zählen die regelmässige Wartung, Inspektion und Ersatz von verschlissenen Komponenten. Der Einsatz der Unterhaltskosten ermöglicht, die Anlagen in einem funktionsfähigen und sicheren Zustand zu halten. Die Unterhaltskosten fallen ab der Inbetriebnahme jährlich an.

In der Schweiz werden die Unterhaltskosten für die Infrastruktur nicht vollständig vom Nutzer, d.h. von den EVU bezahlt. Der Bund gibt über den Bahninfrastrukturfonds BIF Subventionen für das Bahnnetz, auch für den Unterhalt des Bahnnetzes. Gemäss Angaben der SBB werden 35% vom Infrastrukturnutzer (also EVU) über sogenannte Trassenpreise und 65% durch Zuschüsse vom Bund finanziert (SBB Infrastruktur AG 2024). Der vom EVU finanzierte Anteil von 35 % wird in dieser Arbeit den Betriebskosten zugerechnet, welche im kommenden Kapitel 4.8.5 besprochen werden.

Die Unterhaltskosten wurden in dieser Arbeit näherungsweise auf Basis der Baukosten berechnet: Gemäss Angaben der SBB verursachen Infrastrukturausbauten im Unterhalt als jährliche Folgekosten 3% der ursprünglichen Baukosten (Schweizerischer Baumeisterverband 2024). Die mathematische Berechnung der Unterhaltskosten ist in Tabelle 9 abgebildet.

$K_{i,t}^{Unterhalt,\ ungedeckt} = K_i^{Bau} * 0.65 * 0.03$	$K_{i,t}^{Unterhalt,\ ungedeckt}$: Ungedeckte Unterhaltskosten für Infrastrukturentwicklung i pro Jahr K_i^{Bau}: Baukosten für Infrastrukturentwicklung i

Tabelle 9 Berechnung der Unterhaltskosten für Infrastrukturausbauten.

4.8.5 Ungedeckte Betriebskosten

Betriebskosten umfassen sämtliche laufenden Ausgaben, die für den täglichen Betrieb einer Bahnverbindung anfallen. Dazu zählen insbesondere: Personalkosten, Trassenpreise (vgl. Kapitel 4.8.4) sowie Instandhaltung und Amortisation von Zügen. Im Regionalverkehr werden diese Betriebskosten nur teilweise durch die Erträge der Fahrausweise gedeckt. Die daraus resultierenden, ungedeckten Betriebskosten werden durch den Bund und die Kantone finanziert (Bundesamt für Verkehr 2025d). Die ungedeckten Betriebskosten fallen jährlich ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme eines neuen Angebots an.

Die Rentabilität einer Linie wird mit dem Kostendeckungsgrad (KDG) angegeben. Ein KDG von 100 % bedeutet, dass die Betriebskosten vollständig durch die Fahrausweiserträge gedeckt werden. Für alle Linien im Regionalverkehr stellt das Bundesamt für Verkehr entsprechende Daten zu KDG und ungedeckten Kosten zur Verfügung (Bundesamt für Verkehr 2025d). Dadurch lassen sich auch die gesamten Betriebskosten für eine Linie durch $K^{Betrieb} = \frac{K^{Betrieb,ungedeckt}}{1-KDG}$ bestimmen. Diese hängen zudem insbesondere von der Linienlänge und der eingesetzten Zuglänge ab. Als Referenzlinie wurde in dieser Arbeit die S14 (Abschnitt Hinwil–Zürich HB) gewählt, da sie vollständig durch den betrachteten Korridor verläuft. Die S14 verkehrt mit 100 m langen Kompositionen im Normalbetrieb und 200 m in den Stosszeiten. Ihr Betrieb ist in Bezug auf unproduktive Umlaufzeiten repräsentativ für den typischen S-Bahn-Betrieb im Kanton Zürich.

Basierend auf dieser Referenz wird für die Betriebskosten neuer S-Bahn-Linien ein Richtwert von $\kappa^{Betrieb} = 783\ \mathrm{CHF/m/Jahr}$ angenommen. Als Kostendeckungsgrad wird der durchschnittliche Wert des ZVV von 62.3 % verwendet (Volkswirtschaftsdirektion Kanton Zürich 2024). für eine Infrastrukturentwicklung i in Jahr t ergeben sich somit gemäss:

$$K_{i,t}^{Betrieb,\ ungeckt} = \kappa^{Betrieb} * L_i * (1 - KDG).$$

wobei L_i die Länge der neu geschaffenen oder erweiterten Linie i bezeichnet.

4.8.6 Reisezeitersparnisse

Die Reisezeitersparnisse werden berechnet, indem die jährlichen gesamten Reisezeitkosten im Referenzzustand des Netzes 2050 mit jenen nach Umsetzung der jeweiligen Infrastrukturentwicklung i verglichen werden. Die Differenz stellt die monetarisierte Reisezeitersparnis dar und bildet die bedeutendste Nutzenkomponente in dieser Arbeit.

Die jährlichen Reisezeitkosten ergeben sich durch Multiplikation der gesamthaften Reisezeit im Netz mit einem standardisierten monetären Zeitwert – dem sogenannten «Value of Travel Time Savings» (VTTS). In Anlehnung an (Schmid u. a. 2021) wurde für den öffentlichen Verkehr ein VTTS-Wert von 14.1 CHF/h verwendet. Die gesamte jährliche Reisezeit wird berechnet, indem über alle Quell-Ziel-Beziehungen δ der Nachfragematrix das jeweilige Verkehrsvolumen $V_{\delta,i,j}$ mit der dazugehören Reisezeit $TT_{\delta,j}$ multipliziert und aufsummiert werden. Die Berechnungen sind in Tabelle 10 mathematisch definiert.

$N_{ij}^{Reisezeit} = K_{0j}^{Reisezeit} - K_{ij}^{Reisezeit}$ $K_{ij}^{Reisezeit} = VTTS * 365d/a * TTT_{i,j}$ $TTT_{i,j} = \sum_{\delta} TT_{\delta,i} * V_{\delta,i,j}$	$K_{ij}^{Reisezeit}$:Reisezeitkosten für Entwicklung i und Szenario j pro Jahr $VTTS$: Monetarisierter Wert der Reisezeit im Fahrzeug: 14.1 CHF/h $TTT_{i,j}$: Gesamte Reisezeit auf dem Bahnnetz für Entwicklung i und Szenario j $TT_{\delta,j}$: Reisezeit auf der Quell-Ziel-Beziehung δ und für die Entwicklung i $V_{\delta,i,j}$: Verkehrvolumen im ÖV auf der Quell-Ziel-Beziehung δ, für die Entwicklung i und im Szenario j.

Tabelle 10 Berechnung des monetären Nutzens der Reisezeitersparnisse.

4.9 Berechnungszeiten

Die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen erforderten aufgrund der Vielzahl an Szenarien, Ausbauvarianten und der Komplexität des modellierten Bahnnetzes einen hohen Rechenaufwand. Um die Berechnungszeiten effizient zu minimieren, wurden verschiedene Optimierungsmassnahmen umgesetzt.

Ein zentraler Ansatz war die Parallelisierung rechenintensiver Codeabschnitte mittels Multicore-Optimierung. Dies ermöglichte die gleichzeitige Ausführung unabhängiger Prozesse, beispielsweise bei der Bewertung mehrerer Ausbauvarianten oder Szenarien. Zu beachten ist jedoch, dass sich nur solche Codeabschnitte parallelisieren lassen, die keine gegenseitigen Abhängigkeiten aufweisen. Zusätzlich wurde Caching eingesetzt, um bereits berechnete Teilergebnisse zwischenzuspeichern und bei wiederholten Zugriffen erneut zu verwenden. Insbesondere bei der Modifikation von nur bestimmten Teilbereichen des Tools müssen auch nicht alle Module neu gerechnet werden.

Die gemessenen Berechnungszeiten pro Modul sind in Tabelle 11 dargestellt. Insgesamt liessen sich durch die oben beschriebenen Massnahmen trotz hoher Rechenmengen deutliche Zeitgewinne erzielen. Die Berechnungen wurden auf einem Laptop mit der CPU Intel Core i7-8550U mit 4 x 4.00GHz Taktfrequenz und 12 GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

Berechnungszeiten		
Modul	Sekunden (s)	Minuten (min)
Bahnnetzwerk erstellen	17.9	0.30
Generierung der Angebots- und Infrastrukturausbauten	172.3	2.87
Szenarien generieren	539.33	8.99
Verkehrsnachfrage berechnen	41.7	0.70
Reisezeitberechnung auf Graph	125.1	2.09
Berechnung Reisezeitersparnisse	2653.3	44.22
Kostenberechnung	40.2	0.67
Passagierströme auf dem Netz visualisieren	1256.3	20.94
Visualisierung der Resultate	271.8	4.53
Total	**5117.93**	**85.30**

Tabelle 11 Berechnungslaufzeiten des Tools pro Modul.

Die Analyse zeigt zudem, dass der Rechenaufwand linear mit der Anzahl betrachteter Szenarien und Ausbauvarianten ansteigt. Deutlich stärker als linear steigen die Berechnungszeiten jedoch mit der Grösse und Komplexität des modellierten Bahnnetzes, da sich dadurch sowohl die Zahl der Knoten und Kanten als auch die Komplexität der Pfadsuche und Reisezeitberechnung erhöht.

Für zukünftige Anwendungen besteht weiteres Optimierungspotenzial insbesondere durch den Ausbau der Parallelisierung auf zusätzliche Module sowie durch den Einsatz leistungsfähigerer und spezialisierter Funktionsbibliotheken.

5 Resultate

In diesem Kapitel werden primär jene Resultate präsentiert, die eine Planer*in bei der Anwendung des Tools zur Entscheidungsunterstützung erhalten würde. Dabei stehen die generierten Infrastrukturausbauten sowie die daraus resultierenden Kosten und Nutzen im Fokus – inklusive deren Zusammensetzung und Herleitung.

Kapitel 5.1 zeigt die modellierte Verkehrsnachfrage auf dem Bahnnetz für Ausbauten und das Bestandsnetz. In Kapitel 5.2 werden die Ergebnisse der Bewertungsfunktion im Bezug auf die geplanten Ausbauten des AS2035 präsentiert. Kapitel 5.3 fasst schliesslich sämtliche berechneten Kosten und Nutzen der generierten Angebots- und Infrastrukturausbauten zusammen.

5.1 Modellierte Nachfrage auf dem Bahnnetz

5.1.1 Überblick

Durch die Umlegung der modellierten Verkehrsnachfrage auf das Bahnnetz sowie die anschliessende Wegfindung lassen sich die resultierenden Verkehrsströme visualisieren. Diese Auswertung ist für jede Infrastruktur- und Angebotsausbaute, jedes Szenario und jedes betrachtete Jahr möglich. Dadurch kann anschaulich gezeigt werden, wie das Bahnnetz von den Fahrgästen genutzt wird.

Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wird in diesem Kapitel durchgehend die Nachfrage aus dem Zürcher Gesamtverkehrsmodell von 2018 verwendet. Dies ist zulässig, da hier in erster Linie das Verhalten der Wegfindung und die resultierenden Passagierströme im Netz – insbesondere im Kontext geplanter Ausbauten – im Vordergrund stehen. Für die Bewertung der Ausbauten im nächsten Kapitel kommt hingegen die prognostizierte, künftige Nachfrage zur Anwendung.

Zunächst wird in Kapitel 5.1.2 die Nachfrageverteilung im heutigen Referenznetz beschrieben. Die veränderten Reiseströme bei Angebots- oder Infrastrukturausbauten werden in Kapitel 5.1.3 detailliert dargestellt. Den Abschluss bildet in Kapitel 5.1.4 ein Vergleich der modellierten Nachfrage mit realen Daten des ZVV, um die Plausibilität der Resultate zu überprüfen.

5.1.2 Referenzzustand 2050

Abbildung 21 zeigt die Reiseströme auf dem Bahnnetz im Referenzzustand des Jahres 2050. Die Nachfrage wurde gefiltert, sodass nur jene Nachfrage angezeigt wird, welche im Korridor ihre Quelle und/oder Ziel hat. Die starke verkehrliche Verflechtung des Korridors mit der Stadt Zürich ist auf den ersten Blick ersichtlich: Die Kanten mit den höchsten Passagierströmen befinden sich ausserhalb des Korridors auf der Achse Stettbach – Stadelhofen – Zürich HB. Über diese Route werden rund 55'000 Fahrten pro Werktag abgewickelt – der Grossteil der Nachfrage Richtung Zürich. Diese Strecke weist deutlich höhere Fahrgastzahlen auf als die alternative Verbindung über Zürich Oerlikon.

Im Vergleich dazu ist der Gesamtverkehr Richtung Winterthur wesentlich geringer und liegt bei etwa 10'000 Fahrten pro Werktag. Die meisten Umstiege auf dieser Relation erfolgen in Effretikon. Der einzige weitere nennenswerte Verkehrsfluss verläuft in Richtung Rüti und Rapperswil. Auf allen anderen Relationen nimmt das Verkehrsaufkommen mit zunehmender Distanz zum Korridor rasch ab.

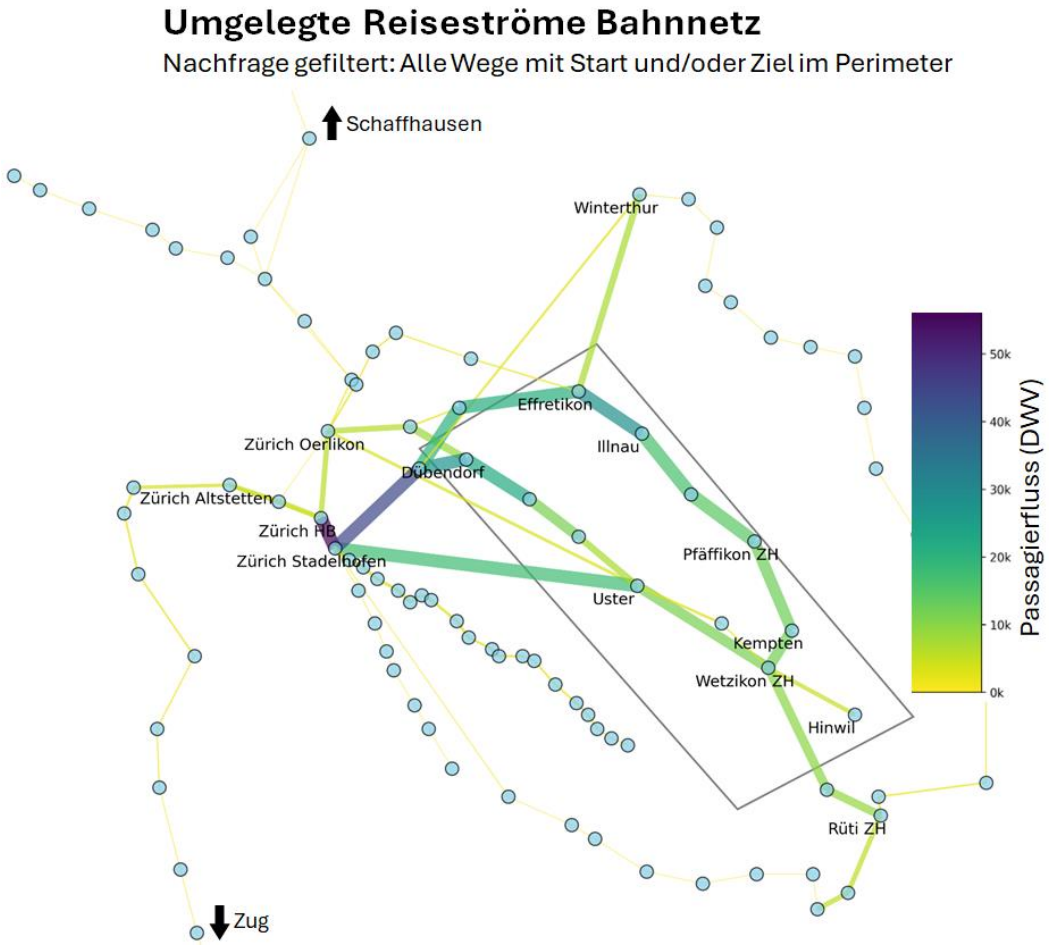


Abbildung 21 Umgelegte Reiseströme auf dem Referenznetz 2050. Gefilterte Nachfrage: Dargestellt sind nur Fahrten mit Start- und/oder Zielpunkt im betrachteten Korridor.

Abbildung 22 zeigt die Reiseströme, wenn die Nachfrage des gesamten Kantons Zürich inklusive der Aussengebiete berücksichtigt wird. Dabei nehmen die Reiseströme ausserhalb des Korridors stark zu – innerhalb des Korridors bleiben sie hingegen unverändert. Eine Ausnahme bildet die beschleunigte Verbindung Stadelhofen – Uster – Wetzikon – (Rapperswil): Sie vervielfacht ihre Fahrgastzahlen und wird zur meistgenutzten Strecke im grossräumigen Bereich zwischen Zürich und Rapperswil von ca. 10'000 auf 30'000 Fahrten. Die Verbindung zwischen Zürich HB und Stadelhofen verzeichnet neu rund 250'000 Fahrten täglich – den höchsten Wert im gesamten Netz. Insgesamt zeigen sich nun sehr starke Verkehrsströme zwischen den innerstädtischen Bahnhöfen von Zürich. Zu den stark belasteten Achsen gehören insbesondere Zürich – Winterthur, Zürich – Rapperswil und Zürich – Zug. Auf diesen Strecken wurde das Bahnangebot allerdings nur teilweise modelliert, da keine direkte Wechselwirkung mit dem betrachteten Korridor besteht.

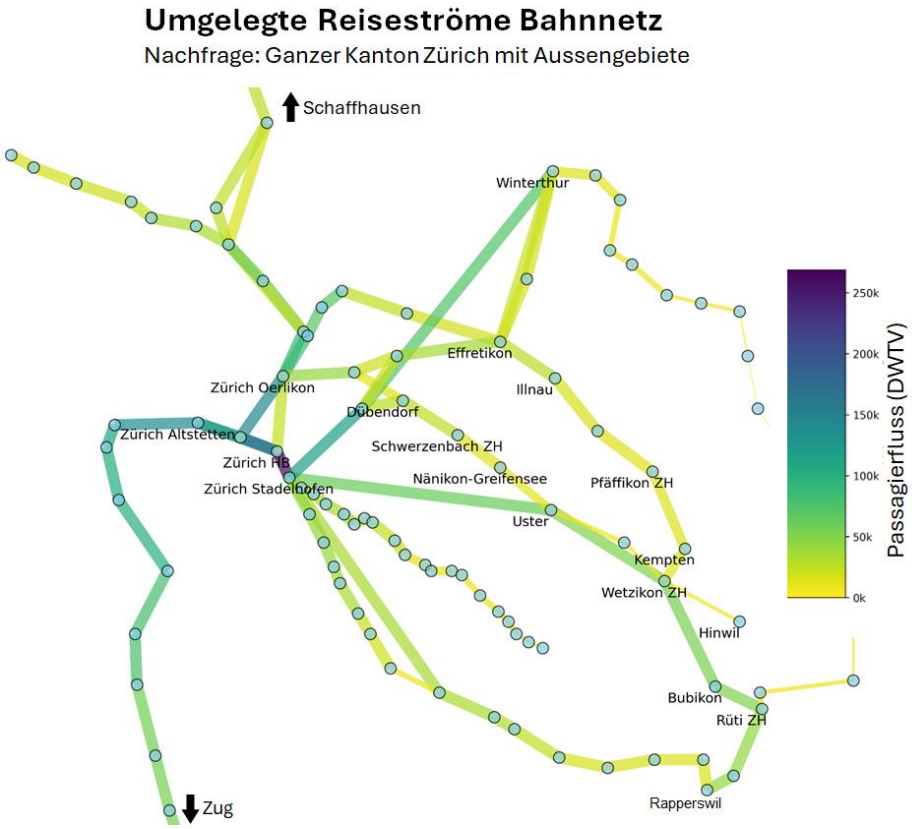


Abbildung 22 Reiseströme des gesamten Kantons Zürich mit Aussengebieten auf das Bahnnetz umgelegt.

5.1.3 Nachfrage mit einem Angebotsausbau

Mit dem vorgestellten Graphen der Passagierströme lassen sich insbesondere auch Veränderungen durch die generierten Angebots- und Infrastrukturausbauten analysieren. In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der neu generierten Linien X2 und X32 auf die Passagierströme dargestellt und beschrieben. Die Linien sowie die dafür notwendigen Verbindungskurven sind in Abbildung 23 dargestellt. Beide Linien schaffen neue Direktverbindungen vom Fallstudienkorridor in Richtung Winterthur: Die Linie X2 verbindet Uster und Winterthur über die neu generierte Verbindungskurve Dübendorf – Dietlikon, die X32 verbindet Winterthur und Pfäffikon über die Verbindungskurve Illnau – Kemptthal. Die damit verbundenen Kosten und Nutzen werden im Kapitel 5.3.2 behandelt.

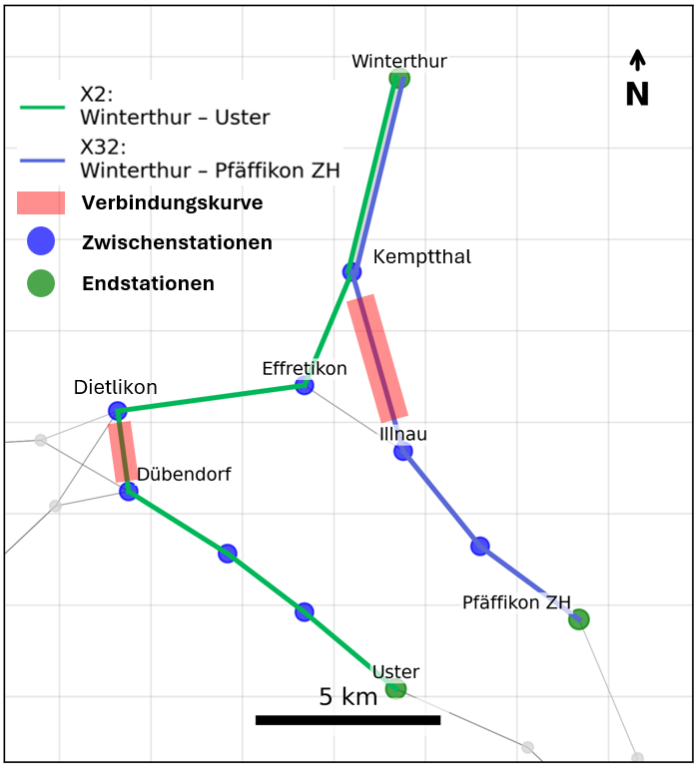


Abbildung 23 Liniendiagramm der generierten Linien X2 und X32 mit den erforderlichen Verbindungskurven.

In Abbildung 24 sind die Effekte der neu generierten Linie X32 Winterthur – Kemptthal – Illnau – Pfäffikon (inkl. Verbindungskurve) auf die Reiseströme dargestellt. Links zeigt die Karte die gesamte modellierte Nachfrage nach Inbetriebnahme des Angebotsausbaus, rechts ist die Differenz zum Referenznetz 2050 visualisiert. Zunahmen ab 200 Fahrten pro Tag sind grün, Abnahmen ab 200 Fahrten rot eingefärbt. Die Verbindungskurve als neue Infrastrukturkomponente ist mit einem roten Pfeil markiert.

Dank der Direktverbindung von Pfäffikon nach Winterthur können Fahrgäste nun ohne Umstieg reisen. Die Linie wird mit rund 6700 Reisenden pro Tag frequentiert (siehe rechts). Die komfortgewichtete Reisezeit zwischen Illnau und Winterthur verkürzt sich von 25 auf 9 Minuten; dies entspricht einer Ersparnis von 12 Minuten durch den entfallenen Umstieg und 4 Minuten Fahrzeitgewinn dank der direkteren Route über die Verbindungskurve. In Illnau kommt es zudem zu 800 zusätzlichen Umsteigebewegungen. Auch auf weiter entfernten Netzabschnitte treten Effekte auf: So verzeichnet die Verbindung ins Tösstal über Winterthur eine Zunahme von rund 200 Fahrten pro Tag; zuvor wurden diese Fahrten noch über Rüti abgewickelt.

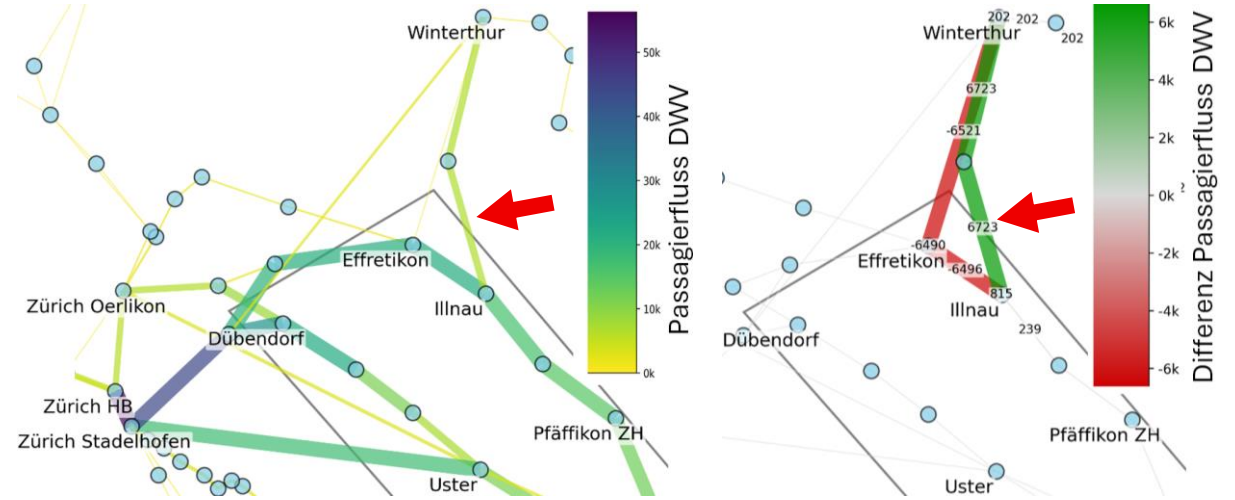


Abbildung 24 Veränderung der Reiseströme durch den Angebots- und Infrastrukturausbau der generierten Linie X32 sowie der Verbindungskurve Illnau – Kemptthal (markiert mit rotem Pfeil). Links: gesamte Nachfrage. Rechts: Differenz zum Referenzzustand des Netzes 2050.

Abbildung 25 zeigt die Veränderung der Reiseströme durch die neu eingeführte Linie X2 Uster – Dübendorf – (Verbindungskurve) – Dietlikon – Winterthur. Dadurch erhält der Abschnitt Uster – Dübendorf eine neue Direktverbindung nach Dietlikon, Effretikon, Kemptthal und Winterthur. Im Differenzdiagramm ist ersichtlich, dass von den 2630 täglichen Fahrten Richtung Winterthur der Grossteil bisher über Stettbach umgestiegen ist. Reisende aus dem Korridor nach Dietlikon fuhren bisher über Wallisellen und benutzen nun auch die neue Verbindungskurve. Diese verzeichnet nun insgesamt eine tägliche Nachfrage von 4490 Fahrten. Reisende aus dem Bereich Uster und Wetzikon sind zudem bisher über Oerlikon gereist. Neben den veränderten Passagierströmen auf den Kanten lassen sich auch an diversen Knoten Änderungen an den Umsteigerzahlen feststellen. Für die meisten Benützer der neuen X2 resultiert eine komfortgewichtete Reisezeitersparnis von 12 – 18 Minuten.

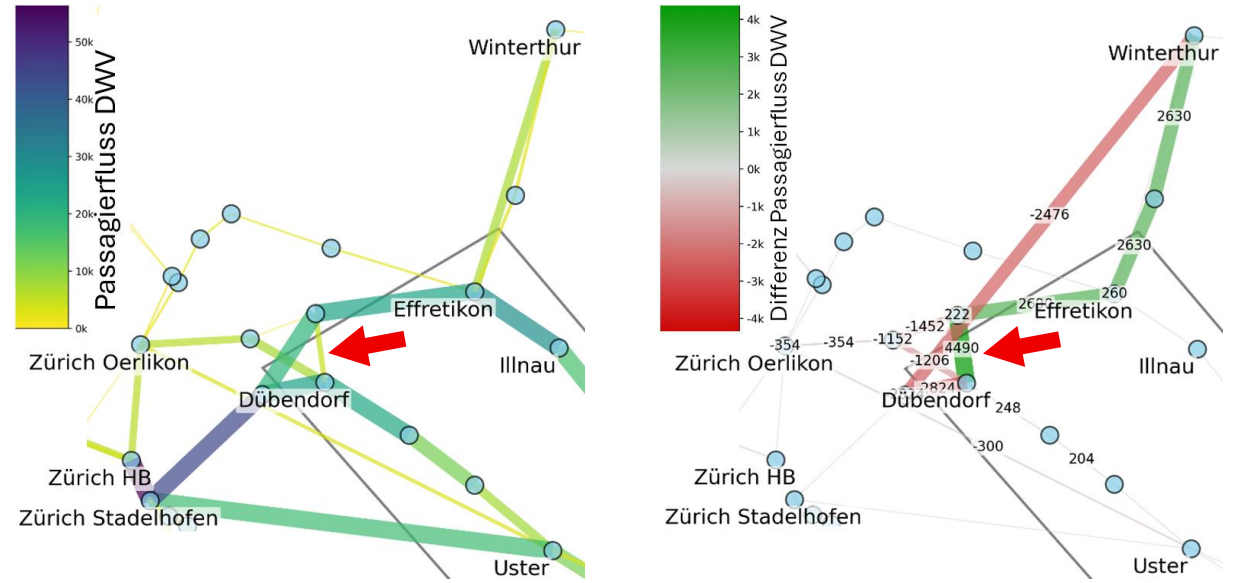


Abbildung 25 Auswirkungen der Linie X2 und der Verbindungskurve Dübendorf – Dietlikon (roter Pfeil) auf die Reiseströme. Links: gesamte modellierte Nachfrage mit Angebots- und Infrastrukturausbau. Rechts: Differenz zum Referenzzustand des Netzes 2050.

5.1.4 Vergleich mit realen Daten

Zur Validierung des Modells wurden vom Zürcher Verkehrsverbund (ZVV) real gemessen Fahrgastzahlen der im Fallstudienkorridor verkehrenden Linien herangezogen. Damit lässt sich die simulierte Nachfrage auf dem Bahnnetz mit den tatsächlich gezählten Fahrgästen abgleichen und die Modellgüte kontrollieren. Die Zähldaten stammen aus dem Jahr 2024, das Modell basiert auf dem heutigen Netz und dem Baseline-Nachfrageszenario 2018 des Zürcher Gesamtverkehrsmodells (Amt für Mobilität Kanton Zürich 2025). Der zeitliche Unterschied von sechs Jahren wurde als vernachlässigbar eingestuft, da das Fahrgastaufkommen währenddessen nur um 1.7 % anstieg (ZVV 2025c).

Für den Vergleich zwischen modellierter und effektiv gemessener Nachfrage wurden zwei Modellvarianten herangezogen:
1. Variante: Es wurde jene modellierte Nachfrage ausgewertet, bei der nur Reisen berücksichtigt werden, die im Korridor starten und/oder enden. Diese Betrachtung bildet eine Untergrenze, da sie die Nachfrage ausserhalb des Korridors – und damit potenziell auch Teile des Durchgangsverkehrs – nicht erfasst.
2. Variante: Hier wurde die gesamte modellierte Nachfrage im Kanton Zürich analysiert. Diese Betrachtung führt tendenziell zu einer Überschätzung der Nachfrage auf den betrachteten Linien, da nicht das gesamte Bahnnetz im Modell enthalten ist und sich die Nachfrage somit auf weniger Linien verteilt. Sie bildet somit eine Obergrenze.

Der Abgleich mit den ZVV-Zähldaten erfolgte auf ausgewählten Streckenabschnitten innerhalb des Korridors sowie an dessen Grenzen. Die Resultate sind in Abbildung 26 dargestellt.

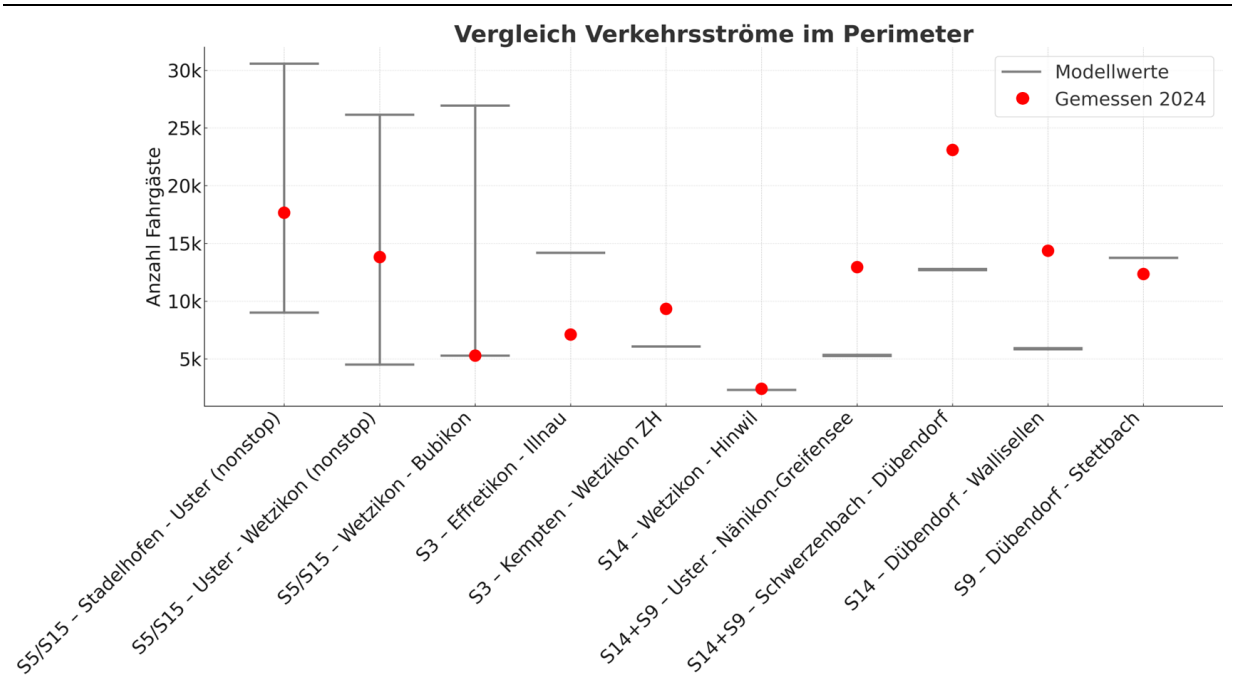


Abbildung 26 Vergleich der modellierten mit der effektiv gemessenen Nachfrage im durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) im Fallstudienkorridor.

Auf Strecken mit hohem Durchgangsverkehr – insbesondere auf den Linien S5 und S15 – weist das Modell zwischen den beiden Varianten eine grosse Spannbreite bei den berechneten Fahrgastzahlen auf. Entscheidend dafür ist, ob die Nachfrage aus dem Umland – also ausserhalb des modellierten Korridors – berücksichtigt wird oder nicht. Demgegenüber weisen Streckenabschnitte, die primär der Erschliessung innerhalb des Korridors dienen (S3, S9 und S14), kaum Unterschiede auf – unabhängig davon, ob externe Nachfrage gefiltert oder vollständig einbezogen wurde.

Für die Linien S5 und S15 liegt die gemessene Nachfrage durchwegs innerhalb der modellierten Unter- und Obergrenzen. Auf den beschleunigten Abschnitten zwischen Stadelhofen und Wetzikon entsprechen die gemessenen Werte in etwa dem Mittelwert zwischen den beiden Modellvarianten. Im nicht beschleunigten Abschnitt Wetzikon – Bubikon stimmen sie ziemlich genau mit der unteren Grenze überein.

Auf den Linien S3, S9 und S14 hingegen unterschätzt das Modell die effektive Nachfrage tendenziell deutlich – insbesondere im Abschnitt Uster–Dübendorf. Ab Dübendorf, am westlichen Rand des Korridors wo sich die Linien Richtung Zürich verzweigen, wird die Nachfrage auf der Verbindung via Wallisellen stark unterschätzt. Die Route via Stettbach hingegen wird vom Modell relativ gut abgebildet. Auf der S3 über Effretikon werden die Fahrgastzahlen eher überschätzt. Auf dem isolierten Abschnitt Wetzikon–Hinwil (S14) stimmen die modellierten und gemessenen Werte dagegen sehr gut überein.

5.2 Bewertung Geplante Ausbauten (AK2035)

Die Bewertungsmethodik für neue, generierte Angebots- und Infrastrukturausbauten wurde ebenfalls auf die bereits geplanten Massnahmen des Angebotskonzepts 2035 (AS2035) angewendet. Ziel ist es, zu prüfen, welche Nutzen realer Ausbauprojekte mit der entwickelten Methodik erfasst werden können. Abbildung 27 zeigt die Entwicklung der gesamten Reisezeit für die gefilterte Nachfrage mit Start und/oder Ziel im Fallstudienkorridor. Verglichen werden der heutige Netzzustand und das in dieser Arbeit verwendete Referenznetz 2050, das die Ausbauten des AS2035 umfasst. Die Analyse deckt den Zeitraum von 2018 bis 2100 ab.

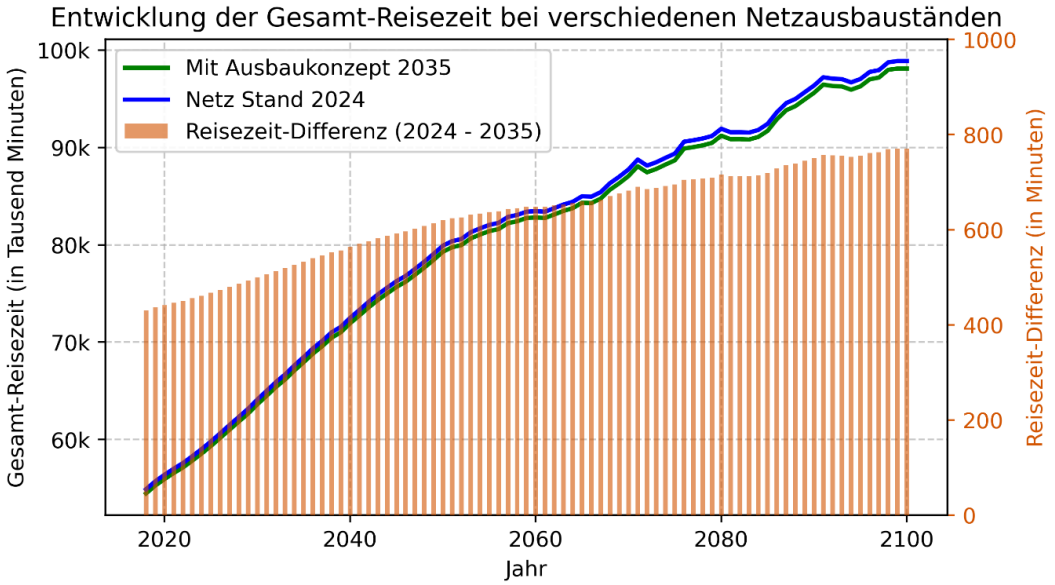


Abbildung 27 Entwicklung der gesamte Reisezeit für die gefilterte Nachfrage mit Start und/oder Ziel im Korridor. Verglichen wird zwischen dem heutigen Netz und dem Referenznetz 2050, welches die Ausbauten des AS2035 beinhaltet.

Da die untersuchten Ausbauprojekte erst noch realisiert werden, sind die ausgewiesenen Reisezeitgewinne ab 2018 bis zum Realisierungszeitpunkt als theoretisch zu betrachten. Sie zeigen jedoch auf, wie sich der potenzielle Nutzen der Massnahmen in Abhängigkeit von der Nachfrageentwicklung im Korridor verändert. So verdoppeln sich die aggregierten Reisezeitgewinne von rund 400 Minuten pro Tag im Jahr 2018 auf etwa 800 Minuten im Jahr 2100. Im Verhältnis zur gesamten Reisezeit bleibt dieser Nutzen jedoch gering und liegt stets unter einem Prozent.

Dabei ist zu beachten, dass ein Grossteil der geplanten Ausbaumassnahmen im Korridor auf eine Taktverdichtung abzielt. Diese Verbesserungen werden durch die Bewertungsfunktion – die auf Reisezeit fokussiert – nicht als Zeitgewinne erfasst. Die einzige effektive Reisezeitverkürzung im Korridor ergibt sich durch die Linie G (vgl. Abbildung 7), welche Oerlikon und Uster ohne Zwischenhalt verbindet und eine Direktverbindung nach Hinwil schafft. Zudem berücksichtigt die Analyse nur Nachfrage mit Quelle und/oder Ziel im Korridor. Entsprechend fallen grössere Effekte ausserhalb des Perimeters – insbesondere die Reisezeitgewinne durch den Brüttener Tunnel zwischen Zürich und Winterthur – nicht in die Bewertung.

5.3 Bewertung generierter Ausbauten

5.3.1 Überblick

Der vorliegende Abschnitt bietet einen Überblick über die Bewertung der generierten Angebotsvarianten, exemplarisch dargestellt anhand neu generierter Linien. Abbildung 28 zeigt die zugehörigen Resultate in Form von Bewertungsdiagrammen.

Für jede Variante werden die einzelnen Kosten- und Nutzenkomponenten separat ausgewiesen. Die modellierten Reisezeitgewinne sind mit zukünftiger Unsicherheit behaftet, weshalb deren Verteilungen als Boxplots oder kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilungen visualisiert werden. In der Folge sind auch abgeleitete Grössen wie der Nettonutzen oder der Kosten-Nutzen-Faktor als Verteilungen dargestellt – entweder in Form von Boxplots oder Violinenplots.

Zur besseren Lesbarkeit sind alle Diagramme farblich den entsprechenden Linien auf der Karte zugeordnet. Die Farben stimmen innerhalb eines Liniensets jeweils überein, welches jeweils in der Abbildungsunterschrift angegeben ist. Die in diesem Kapitel gezeigten Resultate basieren – sofern nicht anders vermerkt – auf der gefilterten Nachfrage, das heisst: Es wurden nur jene Reisebeziehungen berücksichtigt, die im Korridor starten und/oder enden. Die Bewertungsperiode umfasst die Jahre 2050 bis 2100, wobei sämtliche Kosten und Nutzen auf das Preisniveau von 2050 diskontiert wurden.

Die einzelnen Linienvarianten und deren Bewertungsergebnisse werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert besprochen.

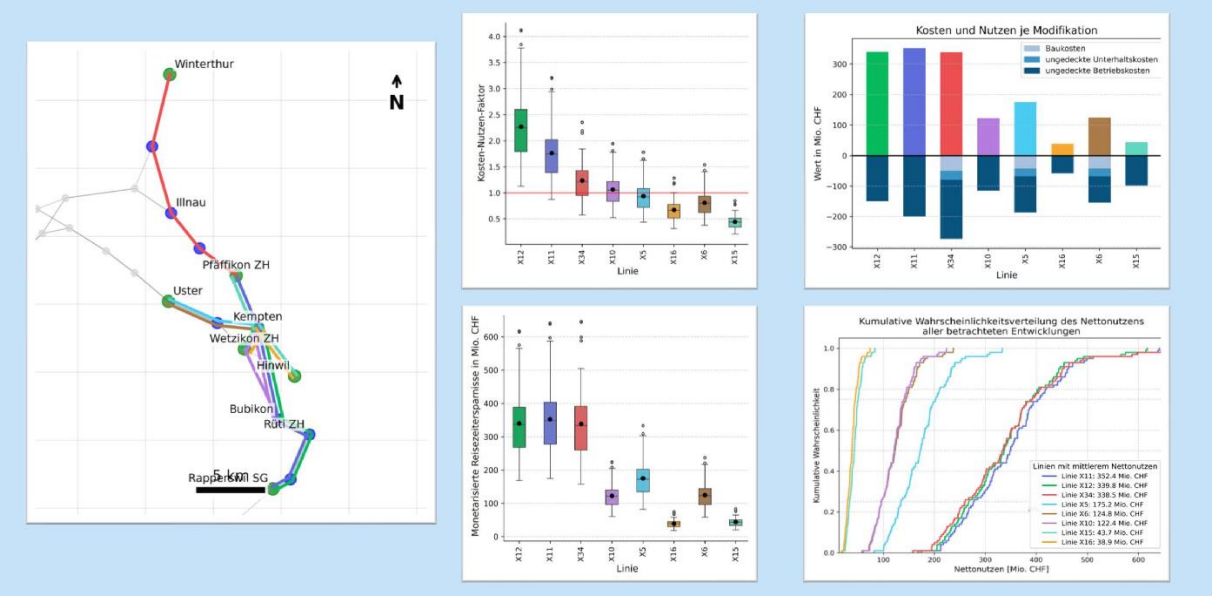


Abbildung 28 Übersicht der Resultate zu den generierten Linien sowie deren Bewertung.

5.3.2 Neue Linien zur Verbindung von Korridoren

5.3.2.1 Bewertung mit gefilterter Nachfrage

In dieser Arbeit wurden insgesamt 33 Linien zur Verbindung von Korridoren generiert und bewertet. Abbildung 29 zeigt die sechs Linien, welche den höchsten Nettonutzen in der Bewertung erzielt haben. Davon bieten fünf Linien rund um den Knoten Wetzikon neue umsteigefreie Verbindungen an, die andere Linie X32 bietet dem Korridor eine Direktverbindung nach Winterthur. Die Linien X11, X12 und X32 sind die längsten Linien und bieten gleichzeitig die höchsten Nutzen durch Reisezeitersparnisse. Wie bereits am Beispiel der Linie X32 im Kapitel 5.1.3 erläutert, resultieren die grössten Reisezeitgewinne aus vermiedenen Umstiegen (je 12 Minuten kürzer), während der kleinere Teil durch die Verkürzung der Reiseroute entsteht. In Abbildung 29 sind die mittleren Reisezeitersparnisse über alle Szenarien hinweg dargestellt, die Kosten bleiben in allen Szenarien konstant. Die Farbe der Balken für die Reisezeitersparnis entspricht dabei der Linienfarbe auf der Karte.

Die Linien X5, X10 und X12 würden ein Wenden in Kempten erfordern und müssen deshalb ausgeschlossen werden. Die Linie X12 könnte alternativ bereits in Kempten enden, während die beiden anderen Linien betrieblich keinen Mehrwert zum heutigen Angebot bieten. Die Linien X11 und X12 sind ausschliesslich angebotstechnische Massnahmen zur Schaffung einer Direktverbindung und benötigen keine Verbindungskurve, da für diese Strecken kein Wenden erforderlich ist. Folglich fallen hier lediglich Betriebskosten an. Grundsätzlich könnten diese Linien auch in Wetzikon halten, da sie die Haltestelle in der Infrastruktur ohnehin durchfahren.

Die Linien X5 und X32 verursachen aufgrund der erforderlichen Verbindungskurven (in Abbildung 29 mit rotem Pfeil markiert) zusätzliche Bau- und Unterhaltskosten. Trotz der eher kurzen Linienlängen dominieren die Betriebskosten, die über 50 Jahre anfallen. Zu beachten ist zudem, dass bei den neu generierten Linien nicht geprüft wurde, ob für den Betrieb zusätzliche Kapazitäten auf der bestehenden Infrastruktur notwendig wären. Umgekehrt wird bei den Reisezeitersparnissen der Einfluss des Taktes einer Linie auch noch nicht berücksichtigt. Schliesslich ist anzumerken, dass die gesamte Bevölkerung der Gemeinde Wetzikon dem Bahnhof Kempten zugeordnet wurde. Neue Direktverbindungen für Kempten führen daher zu besonders hohen Reisezeitersparnissen.

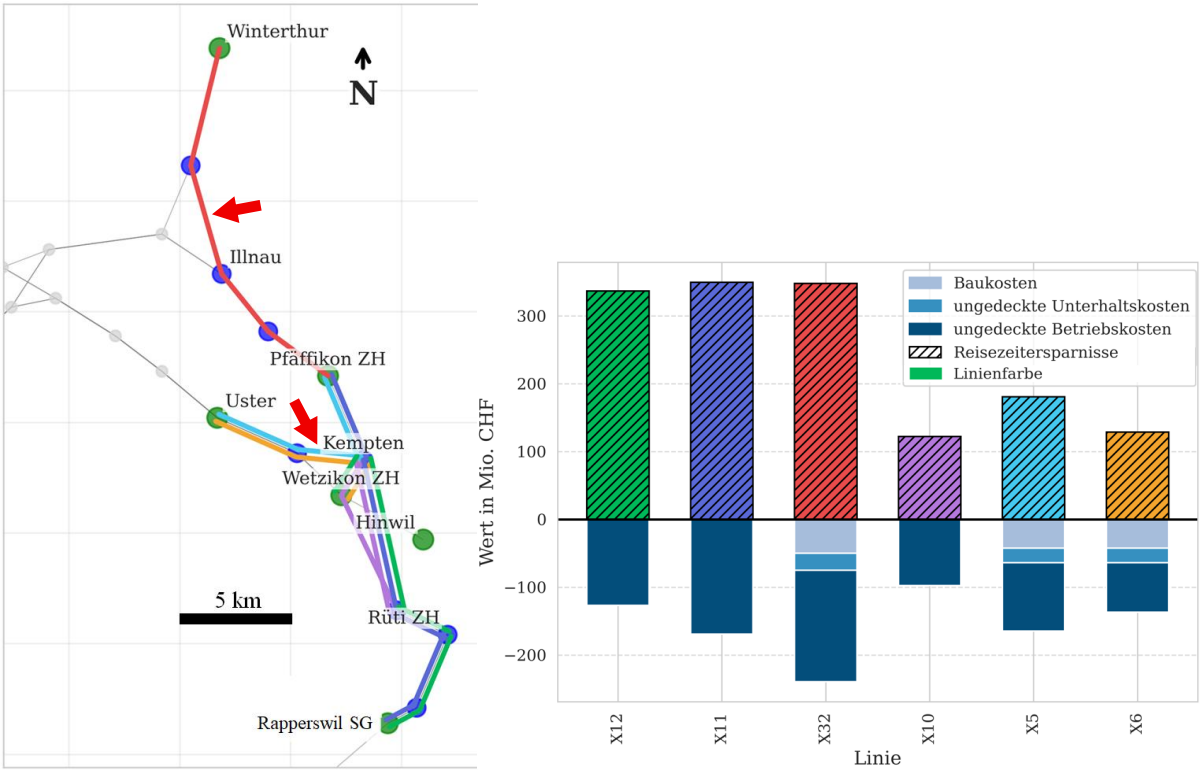


Abbildung 29 Linienset 1. Generierte Linien mit dem höchsten Nettonutzen in dieser Arbeit: Links: Linienplan mit Verbindungskurven, welche mit einem roten Pfeil markiert sind. Rechts: Auflistung der Kosten- und Nutzenkomponenten der Ausbauten. Mittelwerte über alle Szenarien. Die Farben der Linien entsprechen den Farben der Reisezeitersparnis-Balken.

Abbildung 30 zeigt die Verteilung des Kosten – Nutzen Faktors über alle 100 Szenarien für die bereits besprochenen Linien. Obwohl die Linien X11, X12 und X32 ähnliche Reisezeitersparnisse erzielen, weisen die Linien X11 und X12 als reine Angebotsausbauten deutlich höhere Kosten-Nutzen-Faktoren auf. Die Linie X5 erreicht nur in etwa der Hälfte der Szenarien einen Kosten-Nutzen-Faktor grösser als 1. Auch bei diesen sechs Linien mit dem höchsten Nettonutzen gibt es in einzelnen Szenarien Fälle, bei denen der Kosten-Nutzen-Faktor unter 1 fällt.

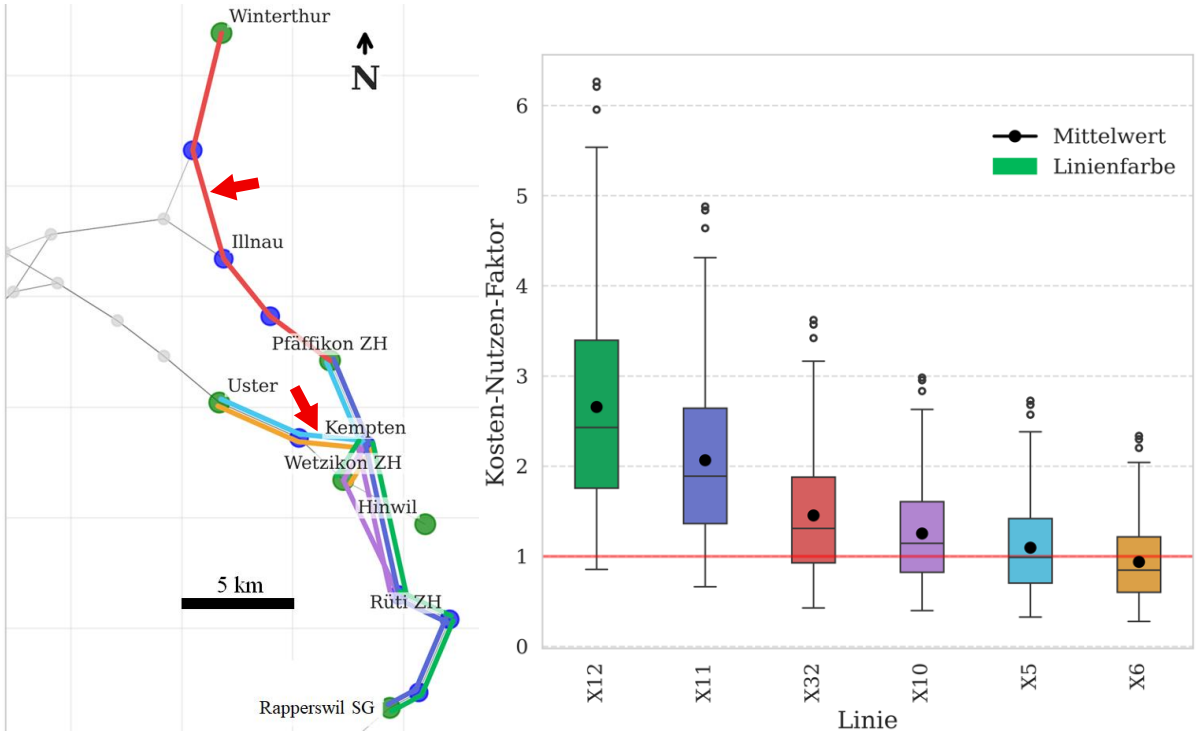


Abbildung 30 Linienset 1. Generierte Linien mit dem höchsten Nettonutzen in dieser Arbeit: Links: Linienplan. Die Verbindungskurven sind mit einem roten Pfeil markiert. Rechts: Boxplot der Kosten – Nutzen Faktoren von allen 100 Szenarien. Die Füllfarbe der Boxen entspricht der Farben der Linie auf der Karte.

Abbildung 31 zeigt die Verteilung der Reisezeitersparnisse der besprochenen Linien über alle Szenarien hinweg. Grundsätzlich fällt auf, dass die Werte nach oben hin deutlich stärker streuen. Dieses Verhalten wurde bereits bei der Szenarien-Generierung beobachtet (siehe Kapitel 4.5). So liegt der Median konsequent unter dem Mittelwert. Besonders die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung verdeutlicht, dass in den oberen Prozentbereichen der Verteilung zum Teil deutlich höhere Reisezeitersparnisse auftreten. Über alle Diagramme hinweg zeigen sich keine überschneidenden Kurven in der kumulativen Wahrscheinlichkeit; vielmehr weisen alle Kurven eine sehr ähnliche Dynamik über die Szenarien auf. Der Faktor zwischen dem unteren und oberen Ende der Spanne beträgt bei allen Linien etwa 6.5 bis 7.5.

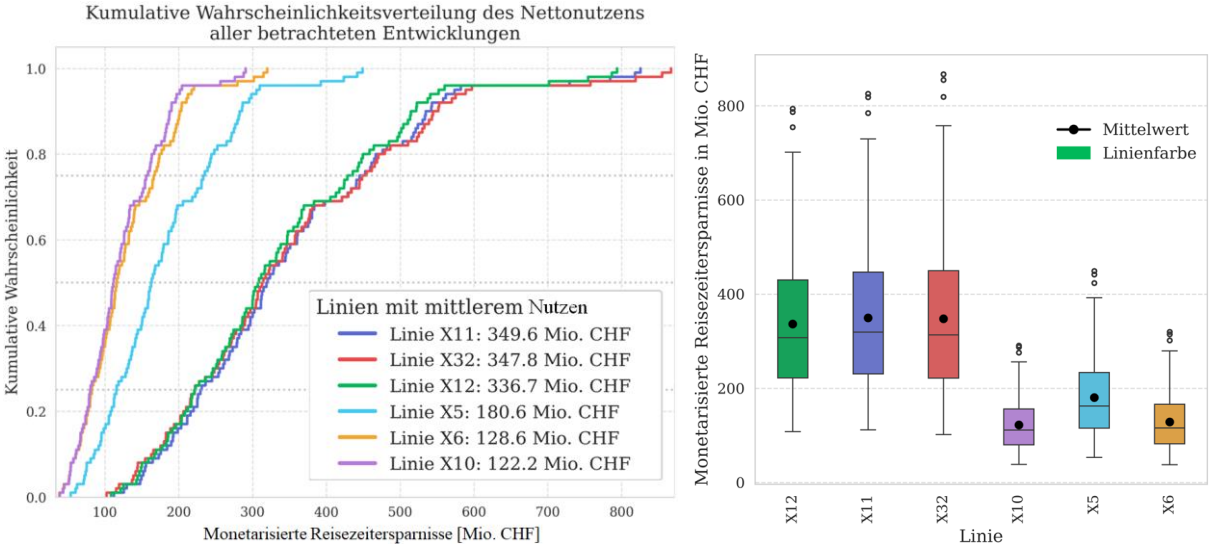


Abbildung 31 Linienset 1. Reisezeitersparnisse der Linien mit dem höchsten Nettonutzen. Links die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung und rechts der Boxplot.

Die nächsten sechs Linien in Abbildung 32, sortiert nach absteigendem Nettonutzen, weisen im Durchschnitt bereits alle geringere Nutzen als Kosten auf. Die bereits im Kapitel 5.1.3 besprochene Linie X2 erzielt zwar hohe Reisezeitersparnisse dank der neuen Direktverbindung nach Winterthur, doch aufgrund ihrer Länge sind die Betriebskosten deutlich höher. Zusätzlich verursachen die Bau- und Unterhaltskosten der erforderlichen Verbindungskurve zwischen Dübendorf und Dietlikon vergleichsweise hohe Ausgaben. Dabei ist zu beachten, dass ein grosser Teil der Linie X2 ausserhalb des Korridors verläuft und die Nachfrage in diesem Abschnitt durch das Filtern tendenziell unterschätzt wird.

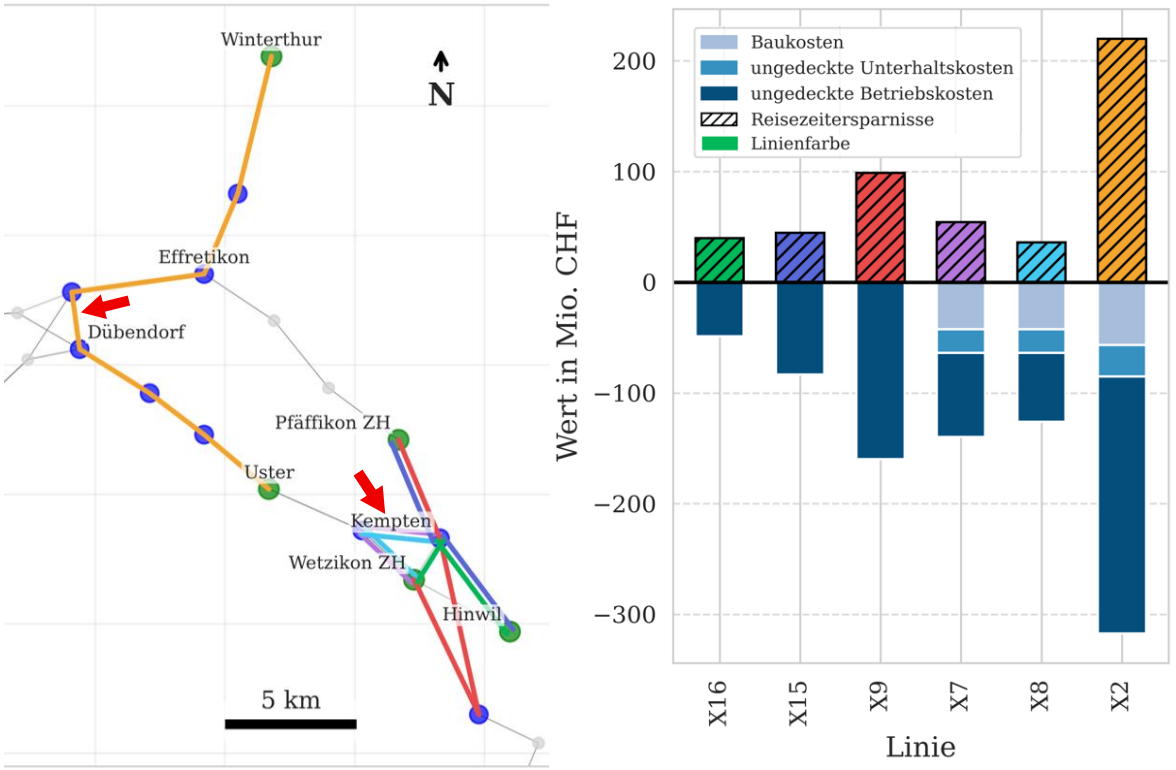


Abbildung 32 Linienset 2. Weitere sechs generierte Linien. Links: Linienplan mit Verbindungskurven (roter Pfeil). Rechts: Auflistung der Kosten- und Nutzenkomponenten der Ausbauten. Mittelwerte über alle Szenarien. Die Farben der Linien entsprechen den Farben der Reisezeitersparnis-Balken.

Im Korridor wurde zudem eine vierte Verbindungskurve Hinwil – Bubikon generiert. Allerdings werden hier keine Linien aufgeführt die diese Infrastruktur nutzen, da die betreffenden Linien einen durchschnittlichen Nettonutzen von rund –100 Mio. CHF aufweisen (Verlust) und in keinem Szenario einen Kosten-Nutzen-Faktor grösser als 1 erreichen. Die Reisezeitersparnisse sind schlicht zu gering, um die Kosten auszugleichen.

5.3.2.2 Bewertung mit der gesamten Nachfrage des Kantons Zürich

In den bisherigen Diagrammen wurde stehts die gefilterte Nachfrage verwendet, wodurch die Nachfrage und somit die Reisezeitersparnisse ausserhalb des Korridors unterschätzt wurden. In Abbildung 33 zeigt die Kosten- und Nutzenbewertung ausgewählter Linien bei Verwendung der gesamten Nachfrage des Kantons Zürich mit Aussengebieten. Dadurch erhöhen sich insbesondere bei Linien, die lange Strecken ausserhalb des Korridors verlaufen, die Reisezeitersparnisse deutlich. So erzielen nun die Linien X24 und X30 die höchsten Reisezeitersparnisse, welche im Mittel die gesamten Kosten deutlich übersteigen. Allerdings wird die Nachfrage ausserhalb des Korridors hier tendenziell überschätzt.

Die Reisezeitersparnisse der Linien X11, X12 und X32 haben sich im Vergleich zur gefilterten Nachfrage kaum verändert, was ein Vergleich mit Abbildung 29 zeigt (allerdings haben sich die Linienfarben im Vergleich zu vorher geändert). Auf diesen längeren Linien dominieren die Betriebskosten, welche deutlich höher sind als die Kosten für die Verbindungskurven. Die Linien X24, X30 und X12 erfordern ein Wenden innerhalb der Linie, was jedoch leicht behebbar wäre.

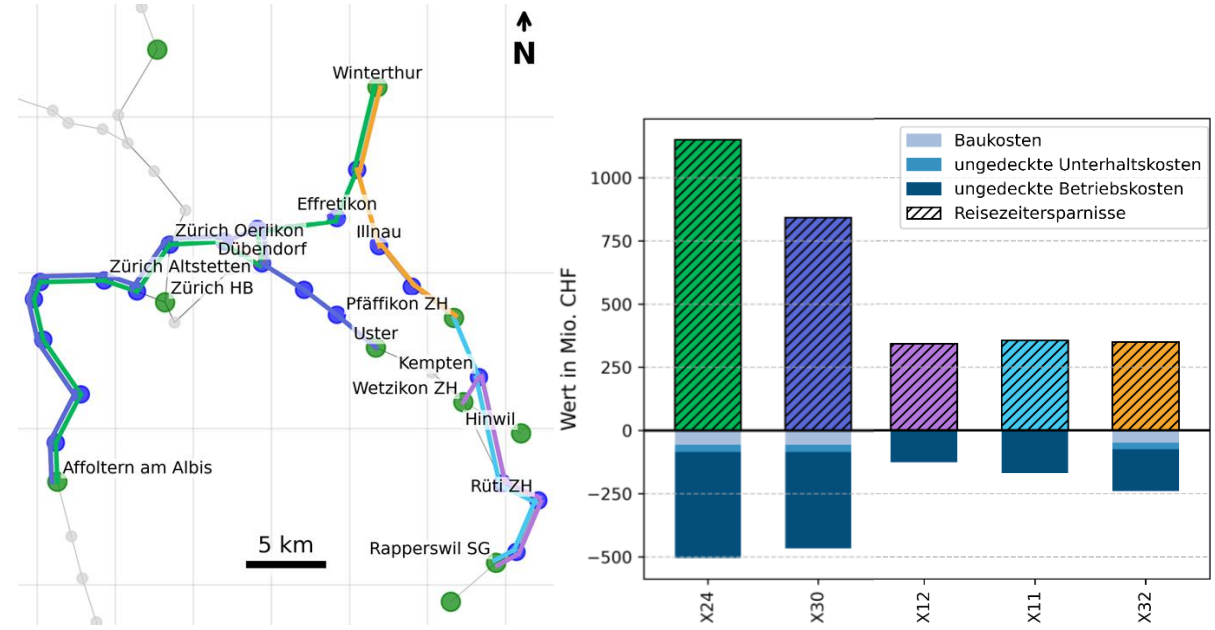


Abbildung 33 Linienset 3. Kosten und Nutzen von ausgewählten Linien bei der Verwendung der gesamten Nachfrage des Kantons Zürich mit Aussengebieten. Links: Linienplan. Rechts: Balkendiagramm der Kosten und Nutzen

Abbildung 34 zeigt zudem, dass die höheren Reisezeitersparnisse zu deutlich höheren Kosten-Nutzen-Faktoren führen und die dargestellten Linien in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle als lohnenswerte Investitionen gelten.

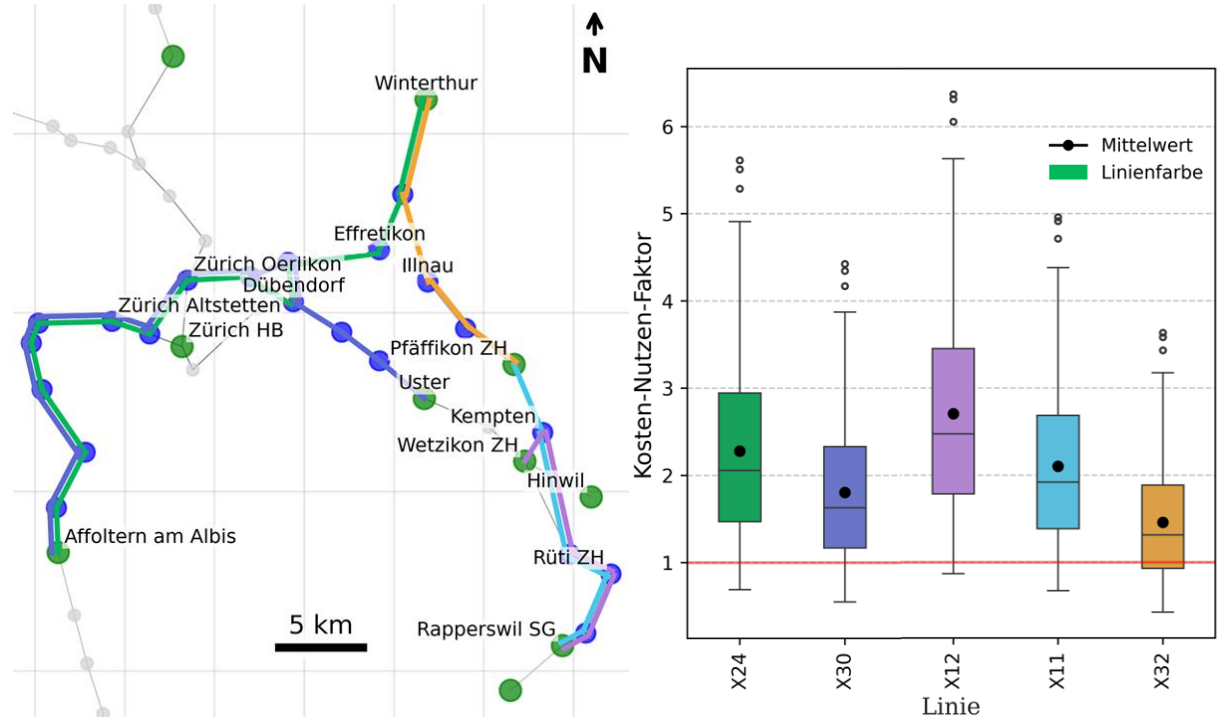


Abbildung 34 Linienset 3. Kosten – Nutzen – Faktor von ausgewählten Linien bei der Verwendung der gesamten Nachfrage des Kantons Zürich mit Aussengebieten. Links: Linienplan. Rechts: Boxplot des Kosten – Nutzen – Faktors.

5.3.2.3 Zeitliche Verteilung von Nutzen und Kosten

Zusätzlich lässt sich auch die zeitliche Verteilung der Kosten und Nutzen über den Bewertungszeitraum hinweg analysieren. Ein Beispiel für die Linie X32 Winterthur – Pfäffikon ist in Abbildung 35 dargestellt. Der Effekt der Diskontierung mit 3% lässt sich klar erkennen. So senken sich beispielsweise die diskontierten Betriebs- und Unterhaltskosten bis ins Jahr 2100 auf rund 20 % des Ursprungswerts von 2050. Die durchschnittlichen monetarisieren Reisezeitersparnisse sinken aufgrund der steigenden Nachfrage bis 2100 nur auf etwa 35%. Wie bei vielen Bauprojekten stehen hier hohe einmalige Baukosten regelmässigen, deutlich geringeren und stark diskontierten jährlichen Gewinnen gegenüber.

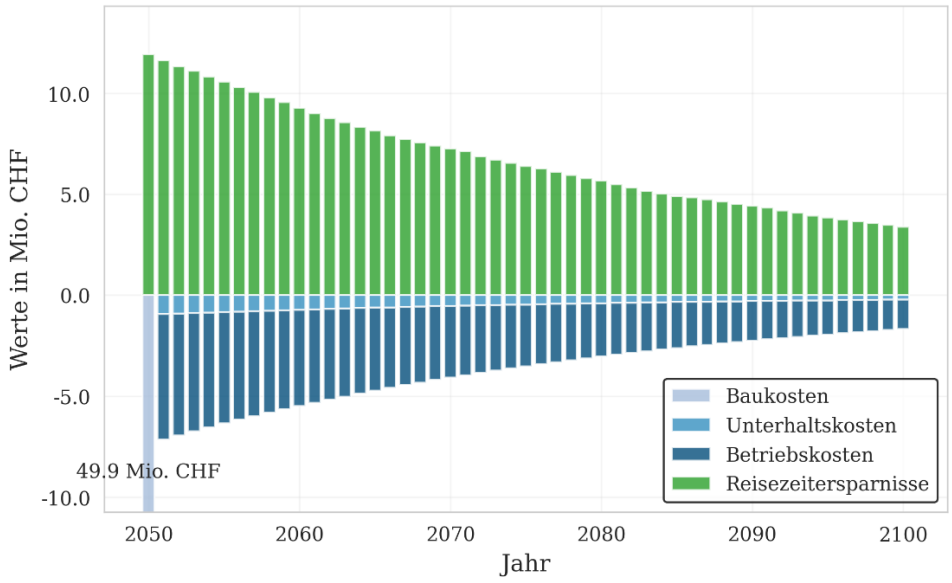


Abbildung 35 Zeitliche Verteilung der diskontierten Kosten und Nutzen für die Linie X32 Winterthur - Pfäffikon. Die Baukosten sind aufgrund ihres hohen Wertes nicht massstäblich dargestellt.

5.3.3 Linie um eine Station verlängern

Die Bewertungsergebnisse der 12 generierten Linienverlängerungen sind in Abbildung 36 dargestellt. Die grössten Reisezeitersparnisse erzielt die Verlängerung 2 von Hinwil nach Kempten, welche Kempten eine Direktverbindung zur beschleunigten S-Bahn über Zürich ermöglichen würde. Die Verlängerung 5 von Uster nach Kemptthal weist den höchsten Nettonutzen auf. Obwohl die Reisezeitersparnisse mit rund 40 Mio. CHF vergleichsweise gering sind, fallen bei dieser Variante keine Bau- und Unterhaltskosten an. Diese Kostenarten dominieren bei den meisten anderen Verlängerungen klar, da dort die bestehende Schienenkapazität nicht ausreicht und ein zweigleisiger Ausbau nötig ist. Da alle Verlängerungen auf bereits vorhandener Infrastruktur erfolgen, können die notwendigen Ausbauten teilweise auf verhältnismässig langen Distanzen notwendig sein.

Die Verlängerung 7 von Uster nach Pfäffikon verursacht mit Abstand die höchsten Gesamtkosten, da die gesamte Strecke von Uster über Wetzikon bis Pfäffikon zweigleisig ausgebaut werden müsste – dies stellt zudem einen grossen räumlichen Umweg dar. Der Algorithmus zur Generierung der Verlängerungen berücksichtigt ausserdem nicht die Fahrtrichtungen im Bahnnetz, weshalb für alle Verlängerungen mit Ausnahme von 2, 5, 8, 9, 10 und 11 ein Wendevorgang erforderlich wäre.

Insgesamt kann nur Verlängerung 5 nahezu die Kosten decken; alle anderen Varianten erweisen sich als unrentabel. Im Unterschied zur Bewertung der neu generierten Linien sind hier die Infrastrukturkosten zur Behebung von entstehenden Kapazitätsengpässen mit in die Analyse eingeflossen.

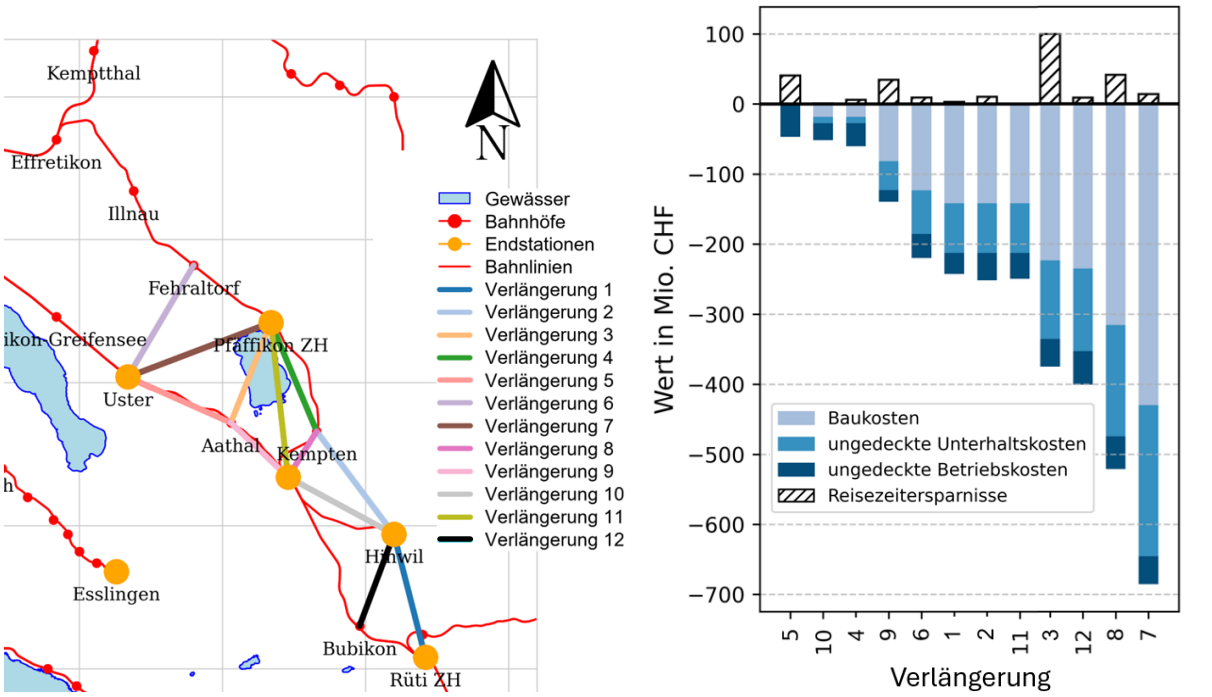


Abbildung 36 Nutzen und Kosten der Linienverlängerungen. Links Übersichtskarte mit den generierten Verlängerungen. Rechts: Darstellung der einzelnen Kostenkomponenten pro Verlängerung, sortiert nach Nettonutzen. Dargestellt sind die Mittelwerte über alle Szenarien. Es besteht keine farbliche Zuordnung zwischen Linienplan und Balkendiagramm.

6 Diskussion

Anhand der in der Fallstudie generierten Ausbauten und deren objektiver sowie nachvollziehbarer Bewertung wird das Potenzial des entwickelten Unterstützungstools für die Planung des zukünftigen Bahnnetz deutlich. Die Machbarkeit konnte durch einen Prototyp aufgezeigt werden, der durch seine Skalierbarkeit und modulare Struktur flexibel weiterentwickelt werden kann.
Im vorliegenden Kapitel werden die einzelnen Module des Tools vertieft diskutiert und hinsichtlich ihrer jeweiligen Limitationen reflektiert. Darüber hinaus wird aufgezeigt, welche potenziellen Ausbauten für das Bahnnetz 2100 mithilfe des Tools identifiziert werden konnten und in welcher Form das Tool künftig eine Anwendung in der Entscheidungsunterstützung der Planung finden kann.

6.1 Diskussion der einzelnen Module

6.1.1 Generierte Angebots- und Infrastrukturausbauten

Bei der Generierung von Netzmodifikationen lag der Fokus klar auf dem Ausbau des Angebots, da dieses die Attraktivität der Verbindungen für die Fahrgäste bestimmt. Darauf aufbauend wurde ermittelt, welche infrastrukturellen Anpassungen zur Umsetzung erforderlich sind. Auf dieser Grundlage kommt ein regelbasierter Algorithmus zum Einsatz, der fehlende Direktverbindungen zwischen Korridoren erkennt, daraus potenzielle neue Linien ableitet und gleichzeitig die Variantenanzahl sinnvoll einschränkt.

In einer Fallstudie konnten für den betrachteten Korridor sechs neue Verbindungen und 33 neue Linien identifiziert werden. Der gesamte Lösungsraum wird dabei systematisch vom Algorithmus durchsucht. Die Anwendung der Methode zeigt zudem, dass sie sich auch problemlos auf grössere Netze übertragen lässt. In der Fallstudie wurden testweise fehlende Direktverbindungen schon weiter über die Korridorgrenzen hinaus bestimmt. Die anschliessende Bewertung mit einer umfassenden Nachfragemodellierung ergab, dass einige der generierten Linien erhebliche Reisezeitverkürzungen ermöglichen und einen positiven Nettonutzen erzielen. Auch profitieren zahlreiche Fahrgäste direkt davon: So könnten neu generierte Linien schon auf Basis der heutigen Nachfrage mit bis zu 6700 Fahrten pro Tag genutzt werden.

Das heutige Schweizer Bahnnetz ist sternförmig ausgerichtet und fokussiert sich vor allem auf die grossen Zentren. Die bessere Verbindung ganzer Korridore untereinander stärkt deshalb die Konnektivität und Robustheit des Netzes und unterstützt die Weiterentwicklung hin zu einem polyzentrischeren Bahnsystem. Dabei entstehen Tangentialverbindungen in den Agglomerationen, und die Bahn wird insbesondere auf Relationen beschleunigt, auf denen sie bisher gegenüber dem Strassenverkehr nicht wettbewerbsfähig ist. Solche Verbesserungen werden auch im Rahmen der Perspektive BAHN 2050 angestrebt (Bundesamt für Verkehr 2025c). Die Methode lässt sich zudem auf beliebige Bahnnetze übertragen, solange Linien- und Infrastrukturnetze als Knoten – Kanten – Graphen vorliegen. Sie eignet sich auch für andere Ausbautypen, um deren Lösungsraum systematisch abzusuchen.

6.1.2 Szenariengenerierung

Die generierten explorativen Zukunftsszenarien bilden die Grundlage für die differenzierte Abbildung langfristiger Unsicherheiten in den möglichen Umweltentwicklungen. Mittels eines stochastischen Random – Walk – Modells wurden jeweils 100 plausible Szenarien für Bevölkerungswachstum, Modal

Split und durchschnittliche Tagesdistanz bis in das Jahr 2100 erstellt und zu Szenarien für die Entwicklung der Verkehrsnachfrage kombiniert. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine umfassende Bewertung, die über klassische Trendszenarien hinausgeht und eine kontinuierliche Bandbreite möglicher Entwicklungen berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Szenarienwerte der Variablen nach oben stärker streuen. Dies liegt daran, dass grössere Ausgangswerte bei identischer Wachstumsrate im Zeitverlauf stärker ansteigen (absolut gesehen). Insgesamt resultiert in der Bewertung der Reisezeitersparnis und dem Nettonutzen eine grosse Spannbreite über alle Szenarien hinweg. Da insbesondere Modal Split und durchschnittliche Tagesdistanz einheitlich für das gesamte Untersuchungsgebiet definiert wurden, zeigen die Bewertungsergebnisse aller Ausbauszenarien, dass sie denselben strukturellen Dynamiken unterliegen. Eine differenzierte Modellierung der Entwicklung in verschiedenen Raumtypen des Bundes würden die reale Umwelt präziser abbilden, konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht umgesetzt werden.

6.1.3 Nachfragemodellierung und Umlegung

Die verwendete Methodik der Nachfragemodellierung ermöglicht eine flächendeckende Abbildung über ein grosses geografisches Gebiet hinweg und besitzt eine gute Skalierbarkeit. So konnte die gesamte Nachfrage des Kantons Zürich inklusive der Aussengebiete berücksichtigt und im Fallstudienkorridor eine realitätsnahe Darstellung der Nachfrage erzielt werden. Für jede Relation der Quell – Ziel – Matrix lassen sich die gewählte Route sowie die entsprechende Reisezeit berechnen und nachvollziehen. Die resultierenden Passagierströme auf dem Bahnnetz lassen sich anschaulich visualisieren und dadurch gut interpretieren. Besonders bei der Analyse von Ausbauten erweist sich dies als hilfreich, da das Modell nachvollziehbar auf Netzveränderungen reagiert und die daraus resultierenden Verschiebungen der Reiseströme realistisch abbildet. Durch gezielte Filterung nach Quelle oder Ziel im Korridor lassen sich für einzelne Linien oder Streckenabschnitte verlässliche obere und untere Auslastungsgrenzen ableiten – besonders ausserhalb des eigentlichen Fallstudienkorridors, wo das Bahnnetz nur generalisiert modelliert wurde. Damit bildet das Modul eine geeignete Grundlage zur Ermittlung von Reisezeitersparnissen durch Ausbaumassnahmen.

Der zugrunde liegende Umlegungsansatz basiert bewusst auf einem einfachen Prinzip, um eine schnelle Umsetzung und einfache Skalierung zu ermöglichen: Jede Gemeinde wird dem nächstgelegenen Bahnhof anhand der kürzesten Luftliniendistanz zugeordnet. Die resultierenden Reiseströme folgen stets dem kürzesten Weg im Bahnnetz, wobei Taktfrequenzen nicht berücksichtigt werden. Durch die Modellierung auf Gemeindeebene ergibt sich eine teils stark variierende räumliche Auflösung. Das Modell weist zudem Schwächen bei der Abbildung von grossräumigem Durchgangsverkehr auf, etwa auf dem Abschnitt Stadelhofen–Uster–Wetzikon sowie bei der Streckenwahl in Richtung Zürich. Da die gesamte Nachfrage nach Zürich dem Hauptbahnhof zugeordnet wird, wird die Nachfrage auf alternativen Routen, etwa über Zürich Oerlikon, deutlich unterschätzt. Eine vertiefte Auseinandersetzung mit diesen Aspekten erfolgt im Kapitel zu den Limitationen. Dennoch zeigt der Vergleich mit realen Fahrgastzahlen, dass die modellierte Nachfrage in ihrer Grössenordnung stimmig ist und die grundlegenden Nutzungsmuster des Bahnverkehrs zuverlässig widerspiegelt. Die vorhandenen Abweichungen zu den realen Zahlen lassen sich zudem sachlich begründen.

6.1.4 Bewertung der Ausbauten

Die Bewertungsfunktion ist das zentrale Instrument, um den gesellschaftlichen Nutzen und die Kosten eines Ausbaus zu ermitteln. Sie arbeitet objektiv sowie monetär und vergleicht Kosten und Nutzen in einer transparenten und einheitlichen Struktur. Damit bietet sie für alle Varianten eine vergleichbare Entscheidungsgrundlage, welche die unterschiedlichen Bedürfnisse der Stakeholder abbildet und

gegeneinander abwiegt. Die wichtigsten Interessen von Eigentümer und Nutzenden wurden in der Funktion explizit berücksichtigt. Jene der betroffenen Öffentlichkeit konnten jedoch noch nicht in die Bewertung miteinbezogen werden. Die jährliche Abbildung von Kosten und Nutzen sowie die Diskontierung über die Betrachtungsdauer gewährleisten eine realistische Bewertung. Reisezeitersparnisse werden dabei jährlich mit dem Nachfragewachstum der Szenarien aktualisiert, um Veränderungen im Netz angemessen zu erfassen.

Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass Betriebskosten bei längeren neuen Linien über den Betrachtungszeitraum hinweg dominant sind. Ausbauvarianten, die vorwiegend Angebotsverbesserungen ohne grosse Investitionen beinhalten, weisen meist den besten Kosten-Nutzen-Faktor auf. Verbindungskurven bieten hohe Reisezeitersparnisse, gehen jedoch mit zusätzlichen Bau- und Unterhaltskosten einher. Monetär basiert der Nutzen momentan nur auf der Reisezeitersparnis, wobei vermiedene Umstiege den grössten Anteil ausmachen.

Die Verteilung des Nettonutzens ist asymmetrisch, mit einem deutlich weiter ausgedehnten oberen Quartil, ähnlich wie bei den generierten Szenarien. Keine Variante zeigt in allen 100 Szenarien durchgängig eine positive Wirtschaftlichkeit. Es lässt sich aber bestimmen, zu welcher Wahrscheinlichkeit ein Ausbau einen positiven Nettonutzen in der Zukunft hätte. Die transparente, anschauliche und detaillierte Darstellung der Resultate durch Boxplots, Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Karten unterstützt die Nachvollziehbarkeit und erleichtert die Akzeptanz sowie den konstruktiven Dialog mit allen beteiligten Stakeholdern.

6.2 Limitationen und Vereinfachungen

6.2.1 Überblick

Die vorliegende Arbeit mit ihrer Fallstudie diente in erster Linie dem Nachweis der Machbarkeit eines datenbasierten Unterstützungstools zur Entscheidungsfindung. Dabei wurden die einzelnen Module in unterschiedlicher Tiefe behandelt – mit einem besonderen Fokus auf die Generierung und Bewertung von Ausbauten. Ein zentrales Ziel bestand zudem darin, eine Methodik zu entwickeln, die auf beliebige Netze übertragbar und in ihrem Umfang skalierbar ist. Die im Folgenden dargestellten Limitationen sind vor diesem Hintergrund zu verstehen. Im abschliessenden Kapitel 7 (Ausblick) werden zudem konkrete Vorschläge gemacht, wie die identifizierten Einschränkungen in künftigen Arbeiten behoben oder zumindest abgeschwächt werden können.

6.2.2 Erforderliche Daten

Für die Umsetzung des Modells sind einige Open-Data-Quellen erforderlich, etwa zur Nachfrageentwicklung, zur Umwelt oder zum Infrastruktur- und Angebotsnetz. Dabei stellte sich insbesondere die Aufbereitung der Daten als aufwendig heraus: So mussten beispielsweise die Daten für das Bahn- und Liniennetz manuell erfasst werden, da keine direkt geeignete Datenstruktur verfügbar war. Auch die Szenarien erfordern eine sinnvolle Verknüpfung mit kantonalen oder regionalen Wachstumsprognosen, um realistische Entwicklungen der Umwelt abbilden zu können. Zudem beeinflussen die Datenstrukturen die technische Umsetzung massgeblich: Je nach Format, inhaltlicher Struktur oder räumlicher Auflösung kann die Datenaufbereitung einen erheblichen Aufwand erfordern, was die Übertragbarkeit auf andere Räume oder Netze erschweren kann. Jedoch ist auch hier Potenzial, gewisse Umwandlungen und Modellierungen zu automatisieren, beispielsweise durch die Umstellung der Quelle der Fahrplandaten auf das weltweite GTFS-Format.

6.2.3 Generierung von Ausbauten

Eine zentrale Limitation des Moduls zur Generierung von Ausbauten besteht darin, dass der verwendete Bahnnetzgraph keine Richtungsinformationen enthält und daher an einem Verknüpfungspunkt nicht erkennt, ob ein Wenden zum Wechseln in einen anderen Korridor erforderlich ist. Dadurch können neue Linien oder Verlängerungen entstehen, die ein Wenden innerhalb der Linie erfordern, was aus betrieblicher Sicht zu vermeiden ist. Zudem muss momentan noch manuell unterschieden werden, ob es sich bei einer generierten Verbindung um eine rein angebotstechnische Massnahme handelt oder ob für das wendefreie Verbinden von Korridoren eine Verbindungskurve notwendig wäre.

Neu generierte Linien enden zudem jeweils am nächstmöglichen Endpunkt auf der Strecke. Das Beachten von weiter entfernen Endpunkten würde weitere vielversprechende Varianten ermöglichen. Darüber hinaus erfolgt keine Prüfung, ob auf den bestehenden Gleisen genügend Kapazität für die neu vorgeschlagenen Linien vorhanden ist und welche Ausbauten dafür nötig sind. Die Projektierung der erforderlichen Verbindungskurven wurde bislang manuell durchgeführt, wäre jedoch auch algorithmisch mit GIS-Werkzeugen umsetzbar.

6.2.4 Generierung von Szenarien

Für die Fallstudie dieser Arbeit wurden 100 Szenarien generiert. Eine grössere Anzahl an Szenarien könnte die Bandbreite möglicher Entwicklungen genauer abbilden, wurde jedoch aus Gründen der Rechenzeit bewusst begrenzt. Diese steigt nämlich linear mit der Szenarienanzahl. Zudem konzentrieren sich die Szenarien bisher ausschliesslich auf die Nachfrageentwicklung und berücksichtigen keine weiteren Umweltfaktoren wie wirtschaftliche, gesellschaftliche oder ökologische Veränderungen. Räumlich sind die Szenarien zudem eher grob verortet: Modal Split und Tagesdistanz gelten für die gesamte Schweiz, die Bevölkerung für ganze Bezirke. Eine genauere räumliche Differenzierung, beispielsweise anhand von Raumtypologien des Bundes, konnte noch nicht implementiert werden.

6.2.5 Modellierung und Umlegung der Nachfrage

Die Modellierung der Nachfrage auf Gemeindeebene führt zu stark variierender räumlicher Auflösung, die in verkehrsintensiven Gebieten wie der Stadt Zürich zur groben Abbildung der Verkehrsströme führt. Hinzu kommt, dass die gesamte Nachfrage einer Gemeinde pauschal einem einzigen Bahnhof zugeordnet wird, was weitere Ungenauigkeiten in der Nachfrage auf dem Bahnnetz verursacht. Ausserdem wird nicht berücksichtigt, mit welchem Verkehrsmittel die Fahrgäste zum Bahnhof gelangen und dass sie daher nicht zwangsläufig den geografisch nächstgelegenen Bahnhof wählen. Diese Einschränkungen führen kleinräumig zu einer ungenauen Nachfrageumlegung.

Die zukünftige prognostizierte Nachfrage wird zudem ausschliesslich anhand der Bevölkerungszahlen proportional auf die Quell – Ziel – Relationen verteilt, wodurch wichtige Einflussfaktoren wie Arbeitsplätze oder Freizeiteinrichtungen unberücksichtigt bleiben. Zudem beschränkt sich die Routenwahl auf den jeweils kürzesten Weg, sodass die Benützung paralleler Linien mit ähnlicher Fahrzeit nicht realistisch abgebildet werden kann. Die vereinfachte Anbindung von Aussenzonen führt zudem zu einer fehlerhaften Modellierung des Durchgangsverkehrs: So wird beispielsweise der Verkehr aus der Südostschweiz im Modell auf die Linien S5/S15 umgelegt, obwohl in der Realität geeignetere Fernverkehrsverbindungen genutzt werden. In Netzen geringerer Komplexität mit wenig alternativen Linienverläufe arbeitet das Modell hingegen zuverlässig.

Darüber hinaus bleibt ein zentraler Aspekt unberücksichtigt: die durch verbesserte Verbindungen induzierte Nachfrage sowie zusätzliches Bevölkerungswachstum entlang ausgebauter Korridore.

Diese Rückkoppelungseffekte wären jedoch wichtig abzubilden, da sie das Verkehrsaufkommen auf den entsprechenden Verbindungen wesentlich beeinflussen können. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden derzeit mögliche Kapazitätsengpässe in den Zügen, die bei steigender Nachfrage zu einem limitierenden Faktor werden könnten.

6.2.6 Bewertung der Ausbauten

Grundsätzlich summieren sich die Limitationen der einzelnen Module bei der Bewertung: Was in den vorherigen Modulen fehlerhaft dargestellt oder modelliert wird, kann folglich nicht korrekt bewertet werden. So wird beispielsweise nicht geprüft, ob auf einer Strecke ausreichend Kapazität für eine neue Linie vorhanden ist, was wiederum die Abschätzung von Bau- und Unterhaltskosten verfälscht. Zudem fokussieren sich die zugrunde liegenden Szenarien ausschliesslich auf die Nachfrageentwicklung und berücksichtigen keine weiteren Faktoren der ökologischen Umgebung, welche insbesondere die betroffene Öffentlichkeit in die Bewertung miteinbeziehen könnten.

Für das Bewertungsmodul ergeben sich darüber hinaus spezifische Einschränkungen: Die Ansätze für Bau- und Unterhaltskosten basieren häufig auf groben Einheitskosten, etwa für Tunnel, Brücken oder Gleise, und werden linear anhand einfacher Grössen wie der Elementlänge berechnet. Auch die Betriebskosten werden linear zur Linienlänge angesetzt. Dadurch bleiben nichtlineare Kostenwirkungen unberücksichtigt, jedoch würde beispielsweise die Produktivität der Fahrzeugumläufe die Betriebskosten stark beeinflussen. Die Kostenannahmen stammen aus unterschiedlichen Jahren und wurden nicht inflationsbereinigt.

Die bewerteten Nutzen konzentrieren sich auf die monetär quantifizierbare Reisezeitersparnisse, wobei ein Wert der Zeitersparnis (VTTS) von 14,1 CHF pro Stunde verwendet wird. Der Grossteil des Nutzens resultiert aus vermiedenen Umstiegen, während andere potenzielle Nutzenfaktoren wie die Frequenz der Verbindungen wenig Berücksichtigung finden. Eine Sensitivitätsanalyse der Parameter, wie beispielsweise des Diskontierungsfaktors, wurde bislang nicht durchgeführt. Dies wäre jedoch wünschenswert, um die Robustheit der Bewertungen besser einschätzen zu können. Insgesamt sind die Bewertungsresultate stark abhängig von den zugrundeliegenden Annahmen und Szenarien, weshalb die Auswahl robuster Ausbauvarianten, die in möglichst vielen Szenarien positiv abschneiden, empfohlen wird.

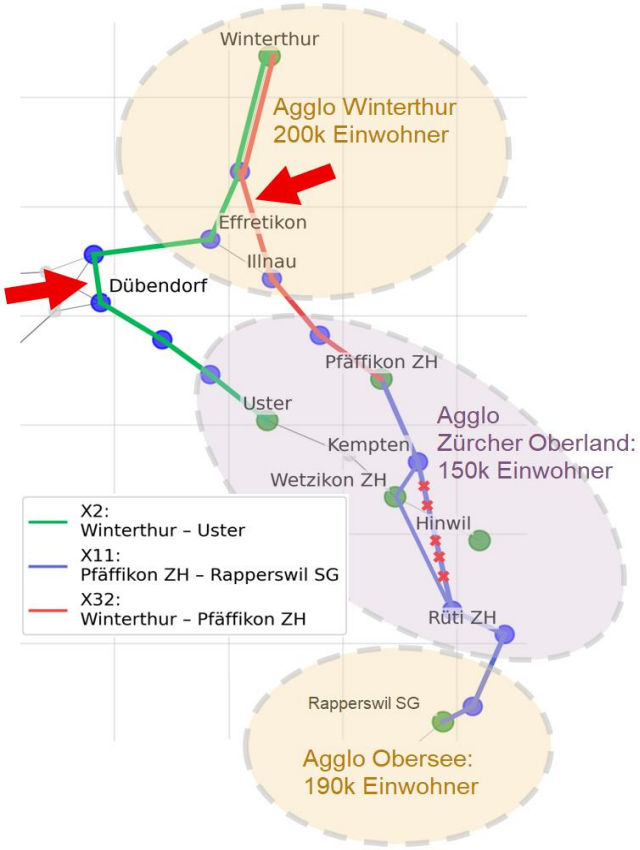
6.3 Anwendung des Unterstützungstools: Perspektiven für das Bahnnetz 2100

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit v.a. auf der Prüfung der Machbarkeit des Tools lag, müsste dieses weiterentwickelt werden, um einen einsatzreifen Stand zu erreichen. Neben den erwähnten Limitationen in den Modulen, zu welchen in Kapitel 7 passende Weiterentwicklungen vorgeschlagen werden, müsste dem Programm ausserdem ein grafisches Interface hinzugefügt werden, das eine intuitive Bedienung durch Planer*innen ermöglicht. Über eine solche Benutzeroberfläche könnten Basisdaten eingelesen, Bewertungseinstellungen angepasst sowie Resultate visualisiert werden. Dies ist besonders relevant, da viele Fachpersonen in der Planung keine vertiefte Programmierausbildung besitzen. Denkbar wäre auch eine teilweise Auslagerung von Modulen in bestehende Fachanwendungen in Form von Programmerweiterung, etwa in eine GIS-Anwendung oder ein Verkehrsmodellierungsprogramm wie PTV Visum für das Nachfragemodul.

Solche Weiterentwicklungen wären notwendig, damit das Tool künftig von Planer*innen in frühen Phasen der Infrastrukturplanung für das Bahnnetz 2100 eingesetzt werden kann. Aus den Ergebnissen der Fallstudie lassen sich dennoch bereits Empfehlungen für das künftige Bahnnetz

formulieren: So liegt in der Schaffung neuer Direktverbindungen im heutigen Netz noch die wirksamste Art zur Verkürzung der komfortgewichtete Reisezeit. Die vorgeschlagenen neuen Verbindungen von Korridoren erhöhen die Polyzentralität und Robustheit des Netzes.

Konkret für den Fallstudienkorridor Dübendorf – Hinwil empfiehlt sich nach der Analyse der präsentierten Ergebnisse eine vertiefte Prüfung einer Direktverbindung nach Winterthur – entweder via Dübendorf oder Illnau – sowie der dafür notwendigen Verbindungskurve. Die Bewertung hat gezeigt, dass bereits unter heutigen Bedingungen rund 6700 Fahrten täglich über diese Verbindung erfolgen würden. In Zukunft dürfte diese Zahl durch steigende Nachfrage und einen veränderten Modal-Split zugunsten des ÖV weiter zunehmen. Zudem wurde eine angebotstechnische Direktverbindung von Rapperswil nach Pfäffikon ebenfalls als vorteilhaft bewertet. Würden diese beiden Ausbauvarianten zu einer neuen Direktverbindung Winterthur – Rapperswil (– Pfäffikon SZ) kombiniert werden, könnte neben den Verbesserungen im Korridor zudem die komfortgewichtete Reisezeit zwischen den Agglomerationen Winterthur und Obersee von heute 62 Minuten auf 40 Minuten reduziert werden. Beide Agglomerationen zeichnen sich durch eine starke Entwicklungsdynamik aus und zählen je ca. 200’000 Einwohnende (Kanton Zürich, Volkswirtschaftsdirektion 2021; EBP Schweiz AG 2025). Solch eine bessere verkehrliche Verknüpfung der drei Regionen könnte einerseits den Modal Split zugunsten des ÖV verschieben und andererseits die Erschliessungsqualität in allen drei Gebieten deutlich erhöhen. Eine Übersicht der empfohlenen Verbindungen zur vertieften Planung bietet Abbildung 37. Es ist jedoch zu betonen, dass es sich bei allen Vorschlägen nicht um eine Umsetzungsempfehlung handelt. Es ist ein Hinweis für ein mögliches Potenzial, das in nachgelagerten Planungsphasen vertieft geprüft werden sollte.



Quelle: Bevölkerungszahlen: (EBP Schweiz AG 2025; Kanton Zürich, Volkswirtschaftsdirektion 2021).

Abbildung 37 Empfohlene Ausbauvarianten für neue Direktverbindungen zur vertieften Planung.

7 Ausblick

Diese Masterarbeit stellt einen Prototyp dar und zeigt die Machbarkeit eines zukünftigen Unterstützungstools für die Bahnnetzplanung auf. Das Potenzial ist deutlich erkennbar, eine Weiterentwicklung bis zur Anwendungsreife ist jedoch notwendig und erfordert sowohl technische als auch methodische Verbesserungen. Die wichtigsten Entwicklungsmöglichkeiten sind folgende:

Generierung von Ausbauten
Durch Richtungsinformationen im Netzgraphen liessen sich automatisch nur Linien generieren, die kein Wenden erfordern. Zusätzlich könnte automatisch erkannt werden, ob für einen Angebotsausbau neue Infrastruktur notwendig ist. Eine erweiterte Auswahl an Endpunkten ermöglicht mehr Kombinationen. Ausserdem könnten auch mehrere fehlende Direktverbindungen durch eine einzige Linie abgedeckt werden. Auch eine Kapazitätsprüfung für neue Linien sowie die Bewertung der allenfalls notwendigen Ausbauten dafür wären sinnvoll. Darüber hinaus sollten auch weitere Typen von Ausbauten generiert werden, etwa neue Bahnstrecken, welche Gemeinden ohne Bahnanschluss anbinden. Zentral ist zudem, dass das volle Potenzial des Algorithmus in einem grösseren Fallstudiengebiet demonstriert wird.

Räumlich und inhaltlich differenzierte Szenarien
Weitere Einflussfaktoren wie wirtschaftliche, gesellschaftliche und ökologische Entwicklungen sollten in die Umwelt des Tools und die Szenarien miteinbezogen werden. Eine stärkere räumliche Differenzierung der Variablen, beispielsweise mithilfe der Raumtypologien des Bundes, ermöglicht eine genauere Modellierung der Umweltdynamik. Mehr Szenarien könnten zukünftige Entwicklungen genauer abbilden, würden aber einen effizienteren Code für akzeptable Rechenzeiten erfordern.

Realistischere Nachfragemodellierung
Induzierte Nachfrage durch Angebotsverbesserungen sollte berücksichtigt werden. Wegwahlmodelle müssten mehrere gleichwertige Verbindungen einbeziehen und nicht nur den kürzesten Weg abbilden. Eine feinere Zonierung, insbesondere in bevölkerungsreichen Gemeinden, sowie eine fahrzeitbasierte Zuweisung der Zonen zu Bahnhöfen über Zubringernetze verschiedener Verkehrsmittel – etwa mit dem Bus – würden zu einer höheren Genauigkeit beitragen.

Detailliertere Nutzen-Kosten-Bewertung
Weitere Nutzen wie höhere Taktfrequenzen sowie externe Effekte, etwa Lärm, Landschaftsveränderung oder Flächenbedarf, sollten berücksichtigt und möglichst monetarisiert werden. Dadurch kann die betroffene Öffentlichkeit als Stakeholder besser in die Bewertung miteinbezogen werden. Die Beachtung nichtlinearer Effekte in der Kostenberechnung erhöht zudem die Realitätsnähe. Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen zu Parametern wie Diskontierung, Zahlungsbereitschaft für Zeitersparnis (VTTS) oder Nachfragewachstum stärken zusätzlich die Aussagekraft.

Benutzerfreundlichkeit und Integration
Ein grafisches Benutzerinterface oder die Anbindung an bestehende GIS- oder Verkehrssoftware würde die Anwendung des Tools und macht es für eine breitere Nutzergruppe zugänglich machen. Ein Preprocessing-Modul für standardisierte Formate wie GTFS würde zudem die Datenaufbereitung vereinfachen. Solche Erweiterungen erhöhen die Praxistauglichkeit und führen das Tool näher an die Anwendungsreife. Denkbar wäre auch, weitere Verkehrsträger zu integrieren, um Vergleiche zu ermöglichen. Zudem könnten für Ausbauvarianten bereits automatisiert Fahrpläne mit Stabilitätsvorgaben erstellt werden – wie in meiner Bachelorarbeit (Fuchs 2023).

8 Fazit

In dieser Arbeit wurde die Machbarkeit eines datenbasierten Tools zur Entscheidungsunterstützung in frühen Phasen der Bahnnetzplanung demonstriert. Auf Grundlage eines Netzgraphen, der auf dem Netz 2050 basiert, konnten algorithmisch Angebots- und Infrastrukturausbauten in Form neuer Linien und Verbindungskurven generiert werden, welche zusätzliche Direktverbindungen zwischen Korridoren ermöglichen. Die Varianz in der möglichen zukünftigen Entwicklung der Umwelt und der gesellschaftlichen Bedürfnisse wurde mit 100 generierten, explorativen Szenarien bis ins Jahr 2100 abgebildet. Darauf aufbauend erfolgte eine realitätsnahe Nachfragemodellierung auf dem Bahnnetz.

Die generierten Ausbauszenarien wurden anschliessend auf Basis definierter Stakeholder-Interessen bewertet und priorisiert. Die Fallstudie im Korridor Dübendorf–Hinwil veranschaulichte die praktische Anwendbarkeit der Methodik. Grundsätzlich ist der Algorithmus jedoch mit geringem Aufwand auf beliebige Bahnnetze anwendbar. Für jede Ausbauvariante und jedes Szenario konnten die Auswirkungen auf die Reiseströme visualisiert und analysiert werden. Die Bewertung erfolgte dabei konsistent anhand monetarisierter Kosten-Nutzen-Kriterien wie Reisezeitersparnissen sowie Bau-, Betriebs- und Unterhaltskosten. Die Ergebnisse wurden Planer*innen in Form verständlicher Karten und Diagramme zugänglich gemacht. Besonders deutlich wurde dabei die Auswirkung der hohen Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen – erkennbar an der teils grossen Streuung der möglichen Nettonutzen und Kosten-Nutzen-Faktoren einer Ausbaumassnahme über alle Szenarien hinweg.

Die Analysen zeigten insbesondere für Direktverbindungen nach Winterthur und Rapperswil ein hohes Potenzial: Sie führen zu deutlichen Reisezeitersparnissen und weisen einen positiven gesellschaftlichen Nettonutzen auf. Solche neuen Tangentialverbindungen stärken die Polyzentrität des Netzes und erhöhen die Attraktivität der Bahn dort, wo sie bisher gegenüber dem motorisierten Individualverkehr nicht konkurrenzfähig ist – ein Ziel, das auch in der Perspektive BAHN 2050 verfolgt wird (Bundesamt für Verkehr 2025c).

Gleichzeitig wurde deutlich, dass bis zur Anwendungsreife des Tools noch Weiterentwicklungen notwendig sind. Dem Netzgraphen müssen Richtungsinformationen hinzugefügt und für den Algorithmus weitere Ausbautypen entwickelt werden. Zudem sollten die Szenarien sowohl räumlich als auch inhaltlich differenzierter und die Nachfrageumlegung detaillierter erfolgen. Die Bewertung könnte um weitere Kosten- und Nutzenaspekte, insbesondere aus Sicht der betroffenen Öffentlichkeit, ergänzt werden. Für eine Anwendung in der Praxis wären zudem ein benutzerfreundliches grafisches Interface sowie eine standardisierte Datenverarbeitung notwendig. Eine Integration in etablierte Planungssoftware wäre ebenso denkbar wie eine Erweiterung des Tools auf andere Verkehrsträger, um Infrastrukturausbauten systematisch übergreifend zu vergleichen und zu priorisieren.

Dennoch zeigt die Arbeit bereits heute das Potenzial des Tools, Planer*innen in frühen Phasen der Bahnnetzplanung zu unterstützen. Der Algorithmus erlaubt es, Ausbaumöglichkeiten in einer Systematik und Anzahl zu generieren, die manuell kaum realisierbar wären. So erhalten Planende ein vorselektiertes Paket bewerteter und priorisierter Varianten, das als fundierte Grundlage für vertiefte Planungsphasen dienen kann. Diese nachvollziehbare Entscheidungsbasis eignet sich auch für die Kommunikation und Rechtfertigung im Planungsprozess. Die explizite Abbildung von Unsicherheiten in den Szenarien ermöglicht zudem eine höhere Robustheit der Entscheidungen und stärkt das Vertrauen der beteiligten Akteure in den Planungsprozess. Mit den skizzierten Weiterentwicklungen könnte das Tool künftig in einer frühen Phase auch Projekte wie Verkehr ’45 unterstützen, in denen der Bund aktuell Ausbauprojekte für Schiene und Strasse priorisiert (News Service Bund 2025).

Referenzen

Alireza Seyedvakili, S., Jabbar-Ali Zakeri, S. Masoud Nasr Azadani, und Yousef Shafahi. 2020. «Long-Term Railway Network Planning Using a Multiperiod Network Design Model». *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems* 146 (1): 04019054. https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000276.

Amt für Mobilität Kanton Zürich. 2025. «Zürcher Gesamtverkehrsmodell (GVM-ZH)». Juli 6. https://www.zh.ch/de/mobilitaet/gesamtverkehrsplanung/verkehrsgrundlagen/gesamtverkehrsmodell.html.

Axhausen, Kay W., Ilka Ehreke, Axel Glemser, u. a. 2014. *Ermittlung von Bewertungsansätzen Für Reisezeiten Und Zuverlässigkeit Auf Basis Der Schätzung Eines Modells Für Modale Verlagerungen Im Nicht-Gewerblichen Und Gewerblichen Personenverkehr Für Die Bundesverkehrswegeplanung: FE-Projekt 96.996/2011 Zeitkosten Personenverkehr. Entwurf Schlussbericht*. ETH Zurich. Application/pdf, 351 p. https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000089615.

Bosshard, M., und J. Matter. 2000. *Congress / International Association for Bridge and Structural Engineering. 1: Lucerne, September 18 - 21, 2000 Congress Report*. IABSE.

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. 2020. *Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017 - Schlussbericht*.

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. 2022. *Schweizerische Verkehrsperspektiven*. Schlussbericht. https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/grundlagen-und-daten/verkehrsperspektiven.html.

Bundesamt für Statistik. 2025a. «Bevölkerungsszenarien Schweiz». Schweiz-Szenarien, April 15. https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/zukuenftige-entwicklung/schweiz-szenarien.html#:~:text=Das%20Referenzszenario%20geht%20von%20einem,11%2C7%20Millionen%20Personen%20z%C3%A4hlt.

Bundesamt für Statistik. 2025b. «Statistik der Bevölkerung und Haushalte (STATPOP)». Juni 11. https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/erhebungen/statpop.assetdetail.35996267.html.

Bundesamt für Umwelt. 2025a. «Netto-Null-Ziel 2050». Januar 3. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050.html.

Bundesamt für Umwelt. 2025b. «Treibhausgasinventar der Schweiz». April 15. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/zustand/daten/treibhausgasinventar.html.

Bundesamt für Verkehr. 2012. «Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)». Juli 25. https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/verkehrstraeger/eisenbahn-bau_undbetriebsordnungebo.pdf.download.pdf/eisenbahn-bau_undbetriebsordnungebo.pdf.

Bundesamt für Verkehr. 2024. *Bahnknoten Basel: Herzstück erfordert einen Tiefbahnhof Basel Badischer Bahnhof*. Mai 2.

Bundesamt für Verkehr. 2025a. *Ausbauschritt 2035*. https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/bahninfrastruktur/ausbauprogramme/ausbauschritt-2035.html.

Bundesamt für Verkehr. 2025b. «Haltestellen des öffentlichen Verkehrs». März 3. https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/fachthemen/geoinformation/geobasisdaten/haltestellen-des-oeffentlichen-verkehrs.html.

Bundesamt für Verkehr. 2025c. «Studien zur Perspektive BAHN 2050». Mai 14. https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/bahninfrastruktur/ausbauprogramme/perspektive-bahn-2050.html.

Bundesamt für Verkehr. 2025d. «Regionaler Personenverkehr: Bestellverfahren». Juni 17. https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/rpv/bestellverfahren.html.

Ceriani, Marco. 2015. *Ceneri-Basistunnel: Gegenwärtiger Baufortschritt und Ausblick*. April. https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_Ceneri-Basistunnel_Gegenwaertiger_Bau-_fortschritt_und_Ausblick-2375048.html.
EBP Schweiz AG. 2025. «Agglomerationsprogramm 5. Generation Obersee, Hauptdokumentation». Juni 30. https://www.aggloobersee.ch/programme/5-generation/.
Eliasson, Jonas. 2025. *Cost overruns of infrastructure projects – distributions, causes and remedies*. Technological Forecasting and Social Change, Mai 9. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/124708/1/MPRA_paper_124708.pdf.
Elvarsson, Arnor B., und Bryan T. Adey. 2024. *The Transport Infrastructure Planning Process in Canton Zürich: With Examples of Planning Infrastructure in Dübendorf-Hinwil Corridor*. ETH Zurich. Application/pdf, 103 p. https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000702760.
Elvarsson, Arnór B., Bryan T. Adey, und David Kaufmann. 2025. «On the Responsiveness of Infrastructure Processes: From Identifying Needs to Delivery». *Infrastructure Asset Management*, Juni 5, 1–15. https://doi.org/10.1680/jinam.23.00034.
Elvarsson, Arnor B., Fabrice Marggi, und Bryan T. Adey. 2024. *A Methodology to Identify and Assess Transport Infrastructure Development Considering Land-Use Uncertainty*. April, 15 p. Application/pdf, 15 p. https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000672982.
Eurostat. 2023. «Bevölkerungsprognosen». Bevölkerung und Demografie: Database. https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/population-demography/population-projections/database.
Flyvbjerg, Bent, Mette K. Skamris Holm, und Søren L. Buhl. 2005. «How (In)Accurate Are Demand Forecasts in Public Works Projects?: The Case of Transportation». *Journal of the American Planning Association* 71 (2): 131–46. https://doi.org/10.1080/01944360508976688.
Fuchs, Silvano. 2023. «Periodic Stability in the Context of Single-track Networks». *BSc Thesis*, Nr. Institute for Transportation Planning and Systems, ETH Zürich (Juni).
Grolle, Jorik, Barth Donners, Jan Anne Annema, Mark Duinkerken, und Oded Cats. 2024. «Service Design and Frequency Setting for the European High-Speed Rail Network». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 179 (Januar): 103906. https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103906.
Guo, Ying, Lingyan Cao, Ying Song, Yan Wang, und Yongkui Li. 2022. «Understanding the Formation of City-HSR Network: A Case Study of Yangtze River Delta, China». *Transport Policy* 116 (Februar): 315–26. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.12.014.
Haasnoot, Marjolijn, Jan H. Kwakkel, Warren E. Walker, und Judith Ter Maat. 2013. «Dynamic Adaptive Policy Pathways: A Method for Crafting Robust Decisions for a Deeply Uncertain World». *Global Environmental Change* 23 (2): 485–98. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006.
Hackl, Jürgen, und Bryan T Adey. 2019. «Modelling Multi-Layer Spatially Embedded Random Networks». *Journal of Complex Networks* 7 (2): 254–80. https://doi.org/10.1093/comnet/cny019.
Hagberg, Aric A., Daniel A. Schult, und Pieter J. Swart. 2008. «Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX». Juni 28, 11–15. https://doi.org/10.25080/TCWV9851.
Hu, Zhibin, Guangdong Wu, Yilong Han, und Yanliang Niu. 2023. «Unraveling the Dynamic Changes of High-Speed Rail Network with Urban Development: Evidence from China». *Socio-Economic Planning Sciences* 85 (Februar): 101380. https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101380.
Kanton Luzern. 2025. «Durchgangsbahnhof Luzern». https://durchgangsbahnhof.lu.ch/projekt.
Kanton Zürich, Volkswirtschaftsdirektion. 2021. «Agglomerations- programme des Kantons Zürich 4. Generation». Mai 19. https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/mobilitaet/mobilitaetsplanung/agglomerationsprogramme/agglomerationsprogramme-4--generation/KTZH_AFM_AP4_Broschuere_Publikumsfassung.pdf.
Lempert, Robert, James Syme, George Mazur, u. a. 2020. «Meeting Climate, Mobility, and Equity Goals in Transportation Planning Under Wide-Ranging Scenarios: A Demonstration of Robust Decision Making». *Journal of the American Planning Association* 86 (3): 311–23. https://doi.org/10.1080/01944363.2020.1727766.
Maier, H.R., J.H.A. Guillaume, H. Van Delden, G.A. Riddell, M. Haasnoot, und J.H. Kwakkel. 2016. «An Uncertain Future, Deep Uncertainty, Scenarios, Robustness and Adaptation: How Do They Fit Together?» *Environmental Modelling & Software* 81 (Juli): 154–64. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.03.014.

Marggi, Fabrice, Arnor B. Elvarsson, und Bryan T. Adey. 2024. *Implementing Early-Stage Highway Planning Support in Dübendorf-Hinwil Considering Uncertain Land-Use and Mobility Demand*. April, 33 p. Application/pdf, 33 p. https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000672985.
Marggi, Fabrice M. 2024. *Predicting the development of the highway network in Dübendorf-Hinwil corridor*. Februar 2.
News Service Bund. 2025. «Verkehr ’45: UVEK priorisiert Ausbauprojekte für Schiene und Strasse». Januar 28. https://www.news.admin.ch/de/nsb?id=103943.
Pamucar, Dragan, Dragana Macura, Madjid Tavana, Darko Božanić, und Nikola Knežević. 2022. «An Integrated Rough Group Multicriteria Decision-Making Model for the Ex-Ante Prioritization of Infrastructure Projects: The Serbian Railways Case». *Socio-Economic Planning Sciences* 79 (Februar): 101098. https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101098.
Papathanasiou, Natalia, Bryan T. Adey, und Marcel Burkhalter. 2019. *Defining and Quantifying Railway Service to Plan Infrastructure Interventions*. September. Application/pdf. https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000440968.
Renninger, Julian Moritz. 2024. *Zielbild für die Mobilität*. Juli.
Rhätische Bahn. 2018. «Medienmitteilung - Einweihung neue Hinterrheinbrücke Reichenau». Oktober 18. https://www.rhb.ch/fileadmin/user_upload/redaktion/Ueber_die_RhB/Medien/Dokumente/Medienmitteilungen/Medienmitteilungen_2018/2018.10.18_Einweihung_Sora_Giuvna.pdf.
Röthlisberger, Philipp. 2024. *Scenario Planning for Rail Infrastructure Development: A Case Study in the Dübendorf-Hinwil Corridor*.
SBB. 2025a. «Doppelspur Grellingen–Duggingen». Kosten, Juli 10. https://company.sbb.ch/de/ueber-die-sbb/projekte/deutschschweiz/region-basel/grellingen-duggingen.html.
SBB. 2025b. «Zimmerberg-Basistunnel 2». Kosten, Juli 10. https://company.sbb.ch/de/ueber-die-sbb/projekte/deutschschweiz/region-zuerich/zuerich-zug-luzern-studie-zimmerberg-basistunnel-2.html.
SBB Infrastruktur AG. 2024. «Das Trassenpreissystem». Das Trassenpreissystem., Juni 17. https://company.sbb.ch/de/sbb-als-geschaeftspartner/leistungen-evu/netzzugang/trassenpreissystem.html.
Scherr, Wolfgang, Patrick Manser, und Patrick Bützberger. 2020. «SIMBA MOBI: Microscopic Mobility Simulation for Corporate Planning». *Transportation Research Procedia* 49: 30–43. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.09.004.
Schmid, Basil, Joseph Molloy, Stefanie Peer, u. a. 2021. «The Value of Travel Time Savings and the Value of Leisure in Zurich: Estimation, Decomposition and Policy Implications». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 150 (August): 186–215. https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.015.
Schweizerischer Baumeisterverband. 2024. *Milliarden für den Bahn-Unterhalt*. Juli 22. https://baumeister.swiss/milliarden-fuer-den-bahn-unterhalt/.
Stadt Zürich. 2025. «Linien des öffentlichen Verkehrs». April 15. https://www.stadt-zuerich.ch/geodaten/download/108.
Stanton, Muriel C. Bonjean, und Katy Roelich. 2021. «Decision Making under Deep Uncertainties: A Review of the Applicability of Methods in Practice». *Technological Forecasting and Social Change* 171 (Oktober): 120939. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120939.
Statistisches Amt Kanton Zürich. 2025. «Bevölkerung in Zahlen - zukünfige Entwicklung». Juli 6. https://www.zh.ch/de/soziales/bevoelkerungszahlen/zukuenftige_entwicklung.html.
Swisstopo. 2024. «Swiss Map Vector».
Systemaufgaben Kundeninformation. 2025. «Informationshub für Kundeninformation und Fahrplandaten». ÖV-Info, Juli 18. https://www.oev-info.ch/de.
Szell, Michael, Sayat Mimar, Tyler Perlman, Gourab Ghoshal, und Roberta Sinatra. 2022. «Growing Urban Bicycle Networks». *Scientific Reports* 12 (1): 6765. https://doi.org/10.1038/s41598-022-10783-y.
Volkswirtschaftsdirektion Kanton Zürich. 2024. «ZVV-Rahmenkredit 2025 und 2026: Regierungsrat beantragt 872 Mio. Franken für den öffentlichen Verkehr». Juli 11. https://www.zh.ch/de/news-uebersicht/medienmitteilungen/2024/07/zvv-rahmenkredit-2025-und-2026-regierungsrat-beantragt-872-mio-franken-fuer-den-oeffentlichen-verkehr.html.
Weidmann, Ulrich. 2020. *Bahninfrastrukturen: Planen - entwerfen - realisieren - erhalten*. 1st ed. Verkehrssysteme, v. 1. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

ZVV. 2025a. «Ausbauschritt 2035». Juli 4. https://www.zvv.ch/de/ueber-uns/infrastrukturprojekte/in-planung/step2035.html.
ZVV. 2025b. «ZVV-Netzpläne». Juli 4. https://www.zvv.ch/de/fahrplan-und-informationen/liniennetzplaene.html.
ZVV. 2025c. «Geschäftsberichte ZVV 2018 und 2024». Geschäftsberichte, Juli 10.
ZVV. 2025d. «Haltestellen- und Linienfahrpläne». Juli 16. https://www.zvv.ch/de/fahrplan-und-informationen/haltestellenfahrplan.html.

Appendix

A1. Verwendete Datensätze

Datensatz	Jahr	Daten-format	Quelle
Bahnlinien S-Bahn Zürich	2025	shp	(Stadt Zürich 2025)
Restliche Bahnliniein	2024	shp	(Swisstopo 2024)
OD Matrix Kanton Zürich	2018	csv	(Amt für Mobilität Kanton Zürich 2025)
Reisezeiten und Linien des Bahnnetzes	2018	andere*	(ZVV 2025d)
Haltestellen des öffentlichen Verkehrs	2025	csv	(Bundesamt für Verkehr 2025b)
Gewässer	2024	shp	(Swisstopo 2024)
Gemeinde- und Bezirksgrenzen	2024	shp	(Swisstopo 2024)
Kantonale Bevölkerungsszenarien	2024	csv	(Statistisches Amt Kanton Zürich 2025)
Bundesweite Bevölkerungsszenarien	2025	csv	(Bundesamt für Statistik 2025a)
Wachtstumsszenario Schweiz bis 2100	2023	csv	(Eurostat 2023)
Bevölkerungsstatistik	2025	raster	(Bundesamt für Statistik 2025b)
Verkehrsperspektiven 2050	2022	Tabelle	(Bundesamt für Raumentwicklung ARE 2022)

*Daten wurden händisch aufgrund der Fahrplanangaben erstellt

A2. Verwendung von KI-Tools

Dieser Abschnitt beschreibt den Einsatz generativer künstlicher Intelligenz im Rahmen dieser Masterarbeit, wie nachfolgend aufgeführt. In allen Kapiteln wurden ChatGPT verwendet, um den akademischen Schreibstil zu verfeinern, die Verständlichkeit zu erhöhen und einen professionellen Ton sicherzustellen. Zusätzlich kam ChatGPT in bestimmten Abschnitten (siehe unten) zum Einsatz, um strukturelle Unterstützung zu bieten – insbesondere bei der Ideenorganisation und Inhaltszusammenfassung. Darüber hinaus unterstützte ChatGPT bei Programmieraufgaben, etwa beim Debugging, bei der Auswahl geeigneter Pakete und bei der Entwicklung von Lösungsstrategien für technische Herausforderungen. Es half zudem beim Kommentieren und Dokumentieren von Python-Code, um dessen Lesbarkeit und Verständlichkeit zu verbessern.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die endgültige Verantwortung für die inhaltliche Richtigkeit, die kritische Reflexion und die Interpretation der Ergebnisse beim Autor/der Autorin dieser Arbeit liegt. Die KI diente lediglich als Werkzeug und nicht als Ersatz für das kritische und analytische Denken des Forschenden.

Einleitung: ChatGPT wurde verwendet, um die logische Struktur des Kapitels zu unterstützen und Vorschläge zur Gliederung des Gedankengangs über die Absätze hinweg zu liefern. Zudem hat es den Schreibstil verfeinert.

Literaturrecherche: Die Auswahl, Bewertung und Einordnung der Fachartikel erfolgten durch die Autorenschaft. ChatGPT half dabei, die ausgewählten Beiträge zusammenzufassen, und den Schreibstil zu verfeinern.

Methodik: ChatGPT wurde verwendet, um einen flüssigeren und besser verständlichen Text zu kreieren.

Fallstudie: ChatGPT wurde genutzt, um den Schreibstil zu verfeinern.

Diskussion: ChatGPT unterstützte bei der Zusammenfassung einzelner Textteile, um Lesefluss und Verständlichkeit zu erhöhen.

Ausblick: ChatGPT wurde eingesetzt, um die wissenschaftliche Qualität des Schreibstils sicherzustellen.

Fazit: Zur Verbesserung der Klarheit und des akademischen Tons kamen ChatGPT zum Einsatz.

Anhang: ChatGPT wurde für einen verbesserten Schreibstil angewendet.

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Declaration of originality

The signed declaration of originality is a component of every semester paper, Bachelor's thesis, Master's thesis and any other degree paper undertaken during the course of studies, including the respective electronic versions.

Lecturers may also require a declaration of originality for other written papers compiled for their courses.

I hereby confirm that I am the sole author of the written work here enclosed and that I have compiled it in my own words. Parts excepted are corrections of form and content by the supervisor.

Title of work (in block letters):

Algorithmusbasierte Entscheidungsunterstützung für die Planung des SBB - Bahnnetzes bis 2100

Authored by (in block letters):
For papers written by groups the names of all authors are required.

Name(s):	**First name(s):**
Fuchs	Silvano

With my signature I confirm that

- I have committed none of the forms of plagiarism described in the 'Citation etiquette' information sheet.
- I have documented all methods, data and processes truthfully.
- I have not manipulated any data.
- I have mentioned all persons who were significant facilitators of the work.

I am aware that the work may be screened electronically for plagiarism.

Place, date	**Signature(s)**
Zürich, 18.07.2025	

For papers written by groups the names of all authors are required. Their signatures collectively guarantee the entire content of the written paper.

ETH Zürich
Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zürich

www.ibi.ethz.ch

© ETH Zürich, Juli 25