

Verkehrsmodellierung für das Ruhrgebiet: Simulationsbasierte Szenariountersuchung und Wirkungsanalyse einer verbesserten regionalen Fahrradinfrastruktur

Ihab Kaddoura¹, Janek Laudan, Dominik Ziemke, Kai Nagel

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik
Salzufer 17-19, 10587 Berlin

Zusammenfassung

In dieser Studie wird die etablierte Methode der Szenariotechnik mit innovativen Ansätzen der dynamischen und agentenbasierten Verkehrsmodellierung kombiniert. Der kombinierte Ansatz verknüpft damit den Bereich der Zukunftsforschung mit der angewandten Verkehrsplanung und ermöglicht die Konkretisierung und detaillierte Untersuchung entwickelter Szenarien bzgl. ihrer Verkehrs- und Umweltwirkungen. Gleichzeitig können verkehrliche Maßnahmen für verschiedene Szenarien untersucht und z.B. bzgl. ihres Nutzens verglichen werden. Der agentenbasierte Modellierungsansatz erlaubt dabei eine personenfeine Analyse des Verkehrsgeschehens in den untersuchten Szenarien.

Als konkrete Fallstudie erfolgt für die Region Ruhr die simulationsbasierte Umsetzung des Szenarios "Gesunde und nachhaltige Stadt" und der Vergleich mit dem Ist-Zustand. Das verwendete Verkehrssimulationsmodell der Region Ruhr bildet das gesamte Verkehrsgeschehen eines durchschnittlichen Wochentages ab. Die Verkehrsnachfrage resultiert aus synthetischen Personen, welche Wege zur Arbeit, zurück zum Wohnort sowie zu sonstigen Aktivitäten zurücklegen und dabei zwischen dem motorisierten Individualverkehr, dem öffentlichen Verkehr sowie nicht-motorisierten Verkehrsmitteln (Fahrrad, zu Fuß) wählen können. Das Verkehrsangebot des Ist-Zustands beinhaltet sämtliche Haupt- und Nebenverkehrsstraßen, den fahrplanbasierten öffentlichen Verkehr sowie fahrradspezifische Infrastruktur.

Die Simulationsexperimente für das Szenario "Gesunde und nachhaltige Stadt" zeigen eine starke Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf den Radverkehr. NOx-Emissionen und Lärmpegel weisen ein signifikant geringeres Niveau als im Referenzszenario auf. Weitere Simulationsexperimente und Maßnahmenuntersuchungen zeigen, dass die Errichtung eines Radschnellwegenetzes in der Region Ruhr sowohl im Basisszenario (Ist-Zustand) als auch im untersuchten Zukunftsszenario zu einer starken Einsparung von Reisezeiten beiträgt und den Wegeanteil des Fahrradverkehrs signifikant erhöht.

¹ E-Mail: kaddoura@vsp.tu-berlin.de; Tel: +49 30 314 78793; Fax: +49 30 314 26269

1 Einleitung und Problemstellung

Vor dem Hintergrund sich verändernder gesellschaftlicher Dynamiken und technologischer Entwicklungen müssen mögliche zukünftige Entwicklungen in die heutige Gestaltung von Verkehrssystemen und konkrete Planung von Infrastrukturmaßnahmen aufgenommen werden.

In der Zukunftsforschung wird die Komplexität des Verkehrssystems meist sehr stark vereinfacht abgebildet. Die weit verbreitete Methode der Szenariotechnik beschreibt zwar den gesamten Kontext einer möglichen zukünftigen Entwicklung (Steinmüller 1997), geht aber nur selten auf die konkreten Veränderungen des Verkehrsangebots und der Verkehrsnachfrage ein. Verkehrliche Veränderungen werden meist auf einzelne Kenngrößen reduziert, z.B. das gesamte Verkehrsaufkommen oder Fahrzeugbesitzraten (Varho und Tapio 2013). Wirkungen unterschiedlicher zukünftiger Entwicklungen lassen sich folglich nur auf sehr abstrakter Ebene und ohne Berücksichtigung des Zusammenspiels von Verkehrsangebot und -nachfrage analysieren.

Bisherige Ansätze modellbasierter Szenariountersuchungen beschränken sich meist auf die Veränderung von Modellparametern in Form von Sensitivitätsanalysen (Bishop, Hines und Collins 2007; Börjeson et al. 2006). Im Bereich der Verkehrsplanung und -modellierung können Maßnahmenuntersuchungen um systematisch variierte Parameter erweitert werden, die auch im Kontext einer veränderten oder ungewissen zukünftigen Entwicklung interpretiert werden können. Ein anderer Ansatz in der Verkehrsplanung ist die Extrapolation von Größen z.B. der Bevölkerung. In der Zukunftsforschung werden diese Betrachtungen üblicherweise als *Trendszenarien*, *überraschungsfreie* bzw. *projektive* Szenarien bezeichnet (Steinmüller 1997). Eine alternative und in der Verkehrsmodellierung weniger stark verbreitete Variante stellen *nicht-überraschungsfreie*, *visions-orientierte* bzw. *imaginative* Szenarien dar (Börjeson et al 2006; Steinmüller 1997). Um letztere Variante der Szenariotechnik geht es in dieser Studie. Ein weit über die reine Trendfortschreibung hinausgehendes und visions-orientiertes Szenario wird in einer detaillierten Verkehrssimulation implementiert und analysiert. Zudem wird für dieses Szenario sowie den heutigen Zustand (Referenzszenario) die Wirkung einer regionalen Radschnellweginfrastruktur untersucht.

In dieser Studie wird die etablierte Methode der Szenariotechnik mit innovativen Ansätzen der dynamischen und agentenbasierten Verkehrsmodellierung kombiniert. Der kombinierte Ansatz verknüpft damit den Bereich der Zukunftsforschung mit der angewandten Verkehrsplanung und ermöglicht die Konkretisierung und detaillierte Untersuchung entwickelter Szenarien bzgl. ihrer Verkehrs- und Umweltwirkungen. Gleichzeitig können verkehrliche Maßnahmen für verschiedene Szenarien untersucht und z.B. bzgl. ihres Nutzens verglichen werden. Der dynamische und agentenbasierte Modellierungsansatz erlaubt dabei eine personenfeine sowie zeitlich hoch aufgelöste Analyse des Verkehrsgeschehens in den untersuchten Szenarien. Weiterhin erlaubt das verwendete Verkehrssimulationssoftware die Berücksichtigung innovativer Mobilitätsangebote (z.B. Radschnellwege, E-Bikes, Robotaxis, Demand Responsive Transit) und ist damit in der Lage Nachfragereaktionen auf zukünftige technologische Entwicklungen vorherzusagen.

2 Verkehrssimulation der Region Ruhr

2.1 Verkehrssimulation mit MATSim

Grundprinzip der Open-Source-Verkehrsplanungssoftware MATSim² (Horni, Axhausen und Nagel 2016) ist die Abbildung der Verkehrsnachfrage in Form individueller Agenten. Jeder Agent hat ein individuelles Verhalten und strebt nach einer Maximierung seines individuellen Nutzens. Die Maximierung des Nutzens erfolgt, indem Aktivitäten wie z.B. "Wohnen", "Arbeiten", "Einkaufen" oder "Freizeit" in den individuell bevorzugten Zeiten ausgeübt werden und gleichzeitig die Wege zu diesen Aktivitäten so angepasst werden, dass individuelle Präferenzen bzgl. monetärer Kosten, der Reisezeit und ggf. weiterer Attribute berücksichtigt werden. Das initiale Verhalten eines Agenten wird durch einen Tagesplan beschrieben, der Informationen über die individuelle Aktivitäten-Wege-Kette enthält, die im Laufe des Tages ausgeführt werden soll. Das initiale Verhalten kann im Laufe der Simulation angepasst und um weitere individuell plausible Variationen erweitert werden, z.B. über eine Anpassung von Aktivitätssorten, Abfahrtszeiten, Verkehrsmittel oder Routen. MATSim nutzt hierfür einen iterativen Ansatz, bestehend aus den folgenden drei Schritten:

- (1) Mobilitätssimulation: Sämtliche Agenten führen ihre individuellen Tagespläne simultan aus und interagieren dabei miteinander in der physischen Realität. Stauereffekte werden dynamisch auf Basis eines Warteschlangenmodells (Gawron 1998) unter Berücksichtigung von Rückstauereffekten simuliert. Jeder Straßenabschnitt verfügt über eine minimale Fahrzeit je Verkehrsmittel. Langsame Verkehrsteilnehmer (z.B. Radfahrer) können von schnelleren Verkehrsteilnehmern (z.B. Pkw) überholt werden; gleichzeitig können unterschiedliche Verkehrsteilnehmer (z.B. Radfahrer und Pkw) in Form von dynamischen Stauereffekten miteinander interagieren (Agarwal et al. 2015). Jeder Straßenabschnitt verfügt über eine Fluss- und Standkapazität (*flow capacity, storage capacity*), die von verschiedenen Verkehrsteilnehmern unterschiedlich stark in Anspruch genommen werden. Ein Fahrrad beansprucht beispielsweise nur 10% der Kapazität, die ein Pkw benötigt.
- (2) Bewertung: Nach Ausführung sämtlicher Pläne bewertet jeder Agent seinen individuellen Tagesplan auf Basis definierter Nutzenfunktionen und Präferenzen. Der Tagesplan erhält einen Nutzen, der über die Auswahlwahrscheinlichkeit und den Erhalt in zukünftigen Iterationen entscheidet.
- (3) Verhaltensanpassung: In der Phase der *choice set generation* (üblicherweise die ersten 80% der Iterationen) verändert ein definierter Anteil an Agenten pro Iteration einen bestehenden Plan um diesen in der nächsten Iteration auszuführen. Die Veränderung kann sich auf definierte Bestandteile der Aktivitäten-Wege-Kette beziehen, z.B. Abfahrtszeiten, Verkehrsmittel und Routen. Die übrigen Agenten wählen aus ihren vorhandenen Tagesplänen auf Basis eines Multinomial Logit Modells aus. In der Phase der *choice set selection* (üblicherweise die letzten 20% der Iterationen) wählen sämtliche Agenten aus ihren bereits vorhandenen Tagesplänen, ebenfalls basierend auf ein Multinomial Logit Modell.

² Multi-Agent Transport Simulation, www.matsim.org

Über eine mehrfache Wiederholung dieser Schritte können Agenten auf verkehrliche Maßnahmen oder veränderte Rahmenbedingungen reagieren und plausible Tagespläne erlangen. Das resultierende Verkehrsgeschehen entspricht der Approximation eines stochastischen Nutzergleichgewichts und bildet damit das Verkehrsverhalten der Realität in seinen wesentlichen Eigenschaften ab (Nagel und Flötteröd 2012).

2.2 Verkehrsmodell der Region Ruhr

Das innerhalb von MATSim implementierte Verkehrssimulationsmodell der Region Ruhr bildet das Verkehrsgeschehen eines durchschnittlichen Wochentages ab. Das Verkehrsangebot des Ist-Zustands beinhaltet sämtliche Haupt- und Nebenverkehrsstraßen, den fahrplanbasierten öffentlichen Verkehr sowie fahrradspezifische Infrastruktur. Die Verkehrsnachfrage resultiert aus synthetischen Personen, welche Wege zur Arbeit, zum Wohnort sowie zu sonstigen Aktivitäten zurücklegen und dabei zwischen dem motorisierten Individualverkehr, dem öffentlichen Verkehr sowie nicht-motorisierten Verkehrsmitteln (Fahrrad, zu Fuß) wählen können.

Die Erzeugung der Verkehrsnachfrage erfolgt in folgenden Schritten, deren Ergebnis eine synthetische Bevölkerung ist, die die reale Bevölkerung mit hinreichender statistischer Genauigkeit repräsentieren soll und in der jede synthetische Person mit ihrer Aktivitäten-Wege-Kette (Tagesplan) eines repräsentativen Tages enthalten ist:

- (1) Auf Basis des Zensus 2011 sowie der Pendlerstatistik der Bundesagentur für Arbeit (Bundesagentur für Arbeit 2010) werden zunächst mehrere initiale Versionen der synthetischen Bevölkerung, erzeugt, die sich hinsichtlich der genauen Lokalisierung des Arbeitsortes unterscheiden.
- (2) Mittels der aktivitätenbasierten Nachfragemodellierungssoftware CEMDAP (Pinjari et al. 2006; Ziemke, Nagel und Bhat 2015) werden auf Basis demografischer Attribute der Person sowie des Wohn- und ggf. Arbeitsorts weitere Aktivitäten (Einkaufen, Freizeit, etc.) jedes Agenten modelliert und in den Tagesplan eingefügt. Hiermit liegen folglich für jeden einzelnen Agenten mehrere Tagespläne vor.
- (3) Über eine Rückkopplung des simulierten Verkehrsgeschehens mit verkehrlichen Kenngrößen bzw. Erhebungsdaten erfolgt eine Auswahl aus diesem Set an Tagesplänen. Die (verhaltensbasierte) Bewertung der simulierten Tagespläne wird um kalibrierungsgesteuerte Nutzenkorrekturterme erweitert, welche die Einhaltung der verkehrlicher Kenngrößen (Verkehrszählraten und Wege je Distanzklasse und Verkehrsmittel) belohnen bzw. Abweichungen von verkehrlichen Kenngrößen bestrafen.

Eine detaillierte Beschreibung der Erstellung einer ersten Modellversion findet sich in Ziemke, Agarwal und Kaddoura (2018). Diese erste Modellversion ist in weiteren Arbeitsschritten überarbeitet worden. Änderungen gegenüber der ersten Modellversion umfassen im Wesentlichen die folgenden Punkte.

- Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wird anstelle der Haushaltsbefragung zur Mobilität Essen 2011 und der Mobilitätsuntersuchung 2014 für den Ennepe-Ruhr-Kreis die Erhebung "Mobilität in Deutschland 2017" (MiD 2017) für die Region Ruhr verwendet.
- Für die simulationsbasierte Auswahl der Tagespläne bei Nutzern des öffentlichen Verkehrs ergibt sich der Nutzenkorrekturterm (analog zur Kalibrierung für die

Verkehrsmittel Fahrrad und zu Fuß gehen) allein aus der Übereinstimmung mit bzw. der Abweichung von distanzklassenbasierten und verkehrsmittelspezifischen Wegehäufigkeiten (Ziemke, Agarwal und Kaddoura 2018). Das öffentliche Verkehrsangebot wird dabei auf Basis von GTFS (General Transit Feed Specification) Daten fahrplanfein im Modell abgebildet. Lediglich für die Auswahl der Tagespläne von MIV-Nutzern werden zusätzlich auch zählstellenbasierte Nutzenkorrekturterme berechnet (zählstellenbasierter Ansatz). Die Gewichtungparameter beider Ansätze werden dabei variiert und die Konfiguration mit den besten Ergebnissen verwendet.

- Nach der simulationsbasierten Auswahl der Tagespläne werden die Aktivitätsorte fixiert und jeder Agent behält lediglich den final ausgewählten Tagesplan. Anschließend wird die ergänzende Bewertung der Tagespläne durch den kalibrierungsgesteuerten Nutzenkorrekturterm deaktiviert. Der Nutzen ergibt sich fortan allein aus den deterministischen Attributen (Reisezeit, monetäre Kosten etc.) und definierten Nutzerpräferenzen. Es erfolgt eine manuelle Kalibrierung des Modells unter Berücksichtigung der Verkehrsmittel-, Routen- und Abfahrtszeitwahl. Agenten haben die Möglichkeit zwischen dem MIV (in der Simulation als *car* bezeichnet), dem öffentlichen Verkehr (ÖV, in der Simulation als *pt* bezeichnet), dem Fahrrad (in der Simulation als *bike* bezeichnet) und zu Fuß gehen (in der Simulation als *walk* bezeichnet) zu wechseln. Dabei werden der MIV und das Fahrrad als sogenannte *chain-based modes* betrachtet, welche für sämtliche Wege einer *subtour* ausgewählt werden müssen. Ein Teil der Wege wird darüber hinaus als "Mitfahrer" (in der Simulation als *ride* bezeichnet) durchgeführt; für diese Wege findet kein Wechsel des Verkehrsmittels statt.
- Analog zu Ziemke, Kaddoura und Nagel (2019) werden die Kosten- bzw. Verhaltensparameter so gesetzt, dass tägliche Fahrzeugvorhaltungskosten nachfrageseitig berücksichtigt werden. Dies erlaubt die Berücksichtigung von Pkw-Kauf- bzw. Verkaufsentscheidungen. Analog werden Entscheidungen für den Besitz einer Zeitkarte für den ÖV berücksichtigt.

Das kalibrierte Verkehrsmodell stimmt bzgl. wesentlicher verkehrlicher Kenngrößen mit den vorliegenden Verkehrserhebungen bzgl. des Modal Splits und der verkehrsmittelspezifischen Reiseweiten aus der MiD 2017 sowie der Verkehrsstärken (kontinuierliche Verkehrszählstellen und temporäre bzw. periodische Zählstellen für 2017, bereitgestellt vom Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen) überein. Für diese Studie wird der derzeitige kalibrierte Zustand des Modells als hinreichend angenommen; in zukünftigen Arbeitsschritten soll eine weitere Feinkalibrierung des Modells erfolgen und die Stichprobengröße der simulierten Nachfrage von 1% auf 10% erhöht werden.

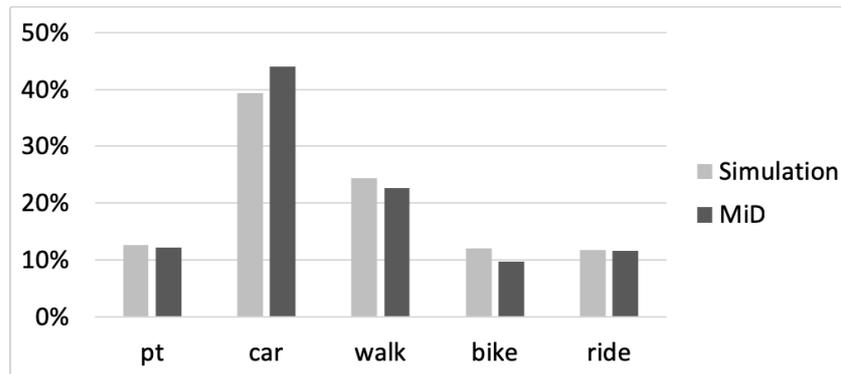


Abb. 1: Vergleich des Modal Split in der Simulation ("Base case") mit der MiD 2017; Für den Vergleich mit den Erhebungsdaten beziehen sich die Simulationsergebnisse in dieser Abbildung ausschließlich auf Personen mit Wohnort innerhalb des Ruhrgebiets. Im Gegensatz dazu beziehen sich die Simulationsergebnisse in den folgenden Abbildungen auf die gesamte Verkehrsnachfrage.

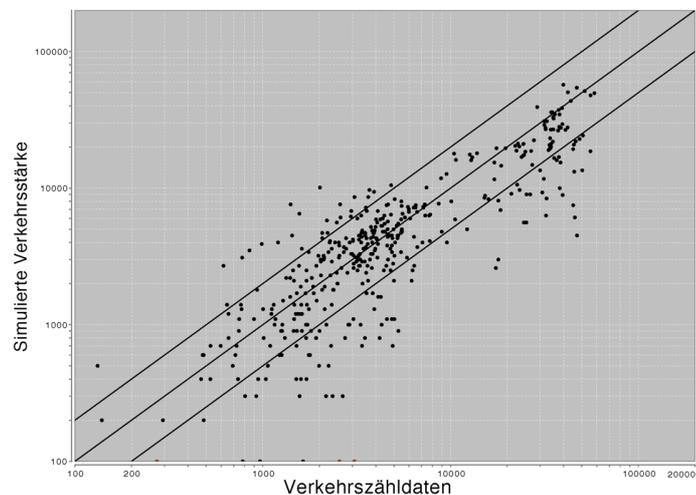


Abb. 2: Vergleich von erhobenen Verkehrszählungen und simulierten Verkehrsstärken (Dauerzählungen und periodische bzw. temporäre Zählungen innerhalb des Ruhrgebiets)

Das Verkehrsmodell der Region Ruhr steht als öffentliches Git-Repository zur Verfügung.³ Größere Input-Dateien sind auf einem separaten Server abgelegt und ebenfalls öffentlich zugänglich.⁴ Für die Simulationsexperimente in dieser Studie ist die Version 1.0 (ruhrgebiet-v1.0-1pct, Stand vom 8. April 2019) verwendet worden.

³ <https://github.com/matsim-vsp/matsim-ruhrgebiet>

⁴ <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/matsim/scenarios/countries/de/ruhrgebiet/>

3 Simulationsbasierte Zukunftsforschung: Annahmen-basierte Szenarioumsetzung

Im Rahmen des Projekts „Neue EmscherMobilität (NEMO)“ wird ein Annahmen-basierter Ansatz genutzt um zukünftige Entwicklungen in der Region Ruhr zu untersuchen. Dabei wird die Raumstruktur im Verkehrsmodell überwiegend als unverändert angenommen. Szenariospezifische Betrachtungen konzentrieren sich primär auf Veränderungen des Verkehrsangebots. Lediglich innerhalb eines Szenarios („Deurbanisierung“) wird die veränderte Raumstruktur auch im Verkehrsmodell betrachtet.

Raumstrukturelle Veränderungen werden in einem separaten, räumlich hoch aufgelösten Modell (Multiscale Urban Modelling, kurz MURMO; Lengyel und Friedrich 2019) simuliert. Die Zusammenführung des Raumstrukturmodells MURMO und des Verkehrsmodells MATSim ist im NEMO-Projekt über die integrierte Auswertung der Ergebnisse beider Modelle im Rahmen der Szenarioanalyse und -bewertung vorgesehen. Darüber hinaus erfolgt in der Szenariobewertung eine Betrachtung weiterer aggregierter Größen, z.B. des Energieverbrauchs, welche mit Hilfe eines makroskopischen System-Dynamics-Simulationsmodell berechnet werden (Melkonyan et al. 2019). Das MATSim-Verkehrsmodell wird zudem genutzt um aus der veränderten Verkehrsinfrastruktur resultierende Erreichbarkeiten zu berechnen, welche als Input für die Stadtentwicklungsmodellierung mit MURMO benötigt werden. Weiterhin sollen Berechnungen aus MURMO für die Umsetzung des Szenarios „Deurbanisierung“ verwendet werden.

Die detaillierten Beschreibungen der im NEMO-Projekt entwickelten Szenarien finden sich in Schmidt und Klemm (2019). Darauf aufbauend werden die wesentlichen verkehrsbezogenen Inhalte der Szenarien aufgegriffen und in Form von Maßnahmenkombinationen bzw. Modellanpassungen konkretisiert. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt:

Szenario „Gesunde und nachhaltige Stadt“

Die Umsetzung des Szenarios „gesunde und nachhaltige Stadt“ innerhalb des MATSim-Modells erfolgt durch folgende Maßnahmen:

- Sperrung von Wohnstraßen für den motorisierten Individualverkehr (MIV); dabei beziehen sich Wohnstraßen auf Straßenabschnitte, die auf OpenStreetMap mit „residential“ attribuiert sind.

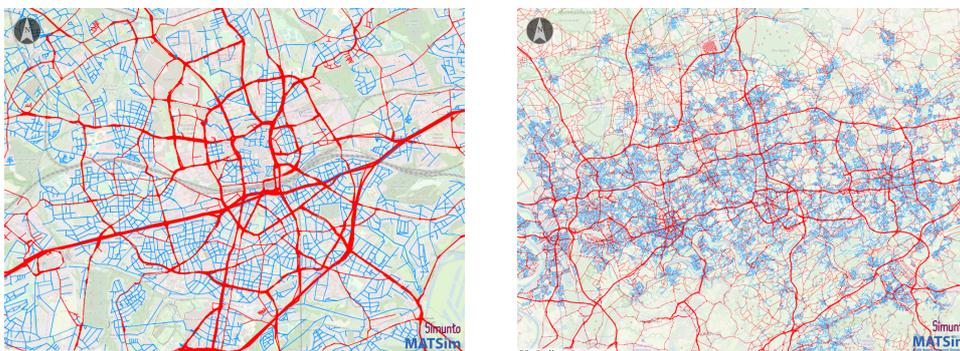


Abb. 3: Verändertes Straßennetz: Nur für Fahrräder zugelassene Straßenabschnitte (blau), für den MIV zugelassene Straßenabschnitte (rot); links: Essen; rechts: gesamtes Ruhrgebiet; Hintergrundkarte: OpenstreetMap

- Umwidmung von Fahrstreifen auf großen Straßen für den Radverkehr; technisch wird dies erreicht, in dem die Kapazität eines Straßenabschnitts für den MIV reduziert und gleichzeitig die Kapazität für den Radverkehr erhöht wird.
- Verdopplung des Takts sämtlicher Linien des öffentlichen Verkehrs (ÖV).
- Implementierung eines Radschnellwegenetzes bestehend aus der derzeitigen Planung der Radschnellverbindungen (RSV) durch den Regionalverband Ruhr (RVR) (Entwurfassung, Sep 2018) sowie des Emschwerwegs. Auf diesen Radschnellwegen wird eine Geschwindigkeit der Fahrradnutzer von 25 km/h angenommen, welche für E-Bikes und eine entsprechend gut ausgebaute Infrastruktur als plausibel betrachtet wird. Weiterhin werden Staueffekte auf RSV vernachlässigt. Im Gegensatz dazu beträgt die maximale Geschwindigkeit für den Radverkehr auf herkömmlichen Straßen 12,5 km/h und kann durch Staueffekte auch darunter liegen. Die RSV werden ähnlich zum Vorgehen in (Agarwal, Ziemke und Nagel 2017) an sämtlichen möglichen Berührungspunkten an das Bestandsnetz angebunden. Die in MATSim implementierten RSV sind in folgender Darstellung in blau abgebildet, das übrige Straßennetz in grau.

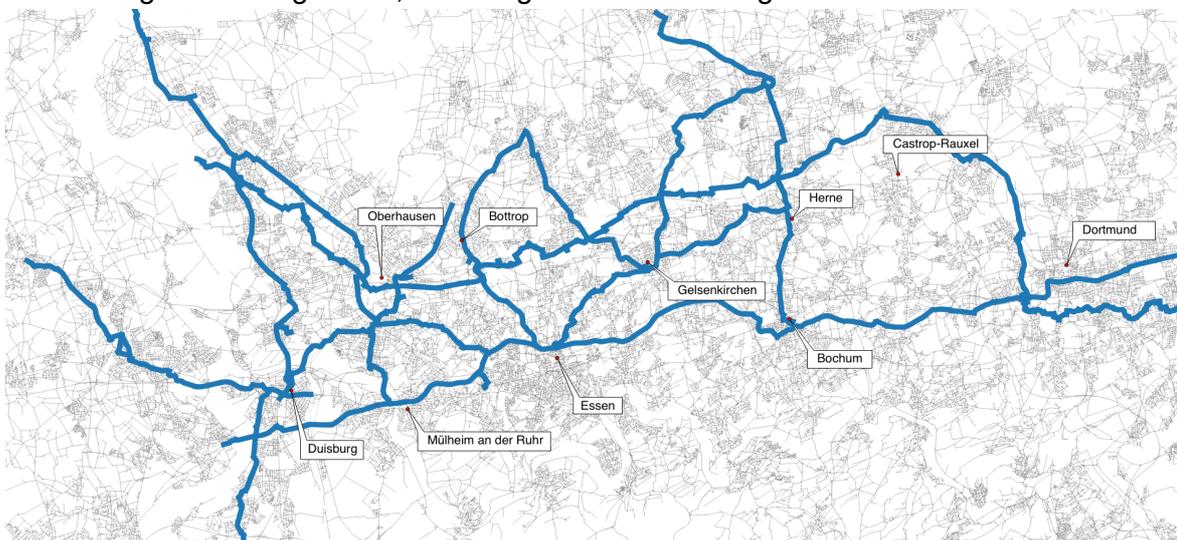


Abb. 4: In MATSim implementiertes Radschnellwegenetz (blau) und übriges Straßennetz (grau)

- Umsetzung einer Pkw-Maut; für MIV-Nutzer fallen zusätzliche distanzbasierte monetäre Kosten in Höhe von 0,20 EUR pro km an.

Szenario “Smart City”

Die Umsetzung des “Smart City” Szenarios wird im MATSim-Modell durch die Implementierung zusätzlicher bzw. veränderter Modi erreicht. Hierzu zählen:

- Ein definierter Anteil der Agenten besitzt ein privates autonomes Fahrzeug, für das andere Verkehrsflussparameter eingestellt werden können.
- Das Verkehrsangebot wird durch geteilte autonome Fahrzeuge (ohne Ride-Sharing) und autonome Sammeltaxis (mit Ride-Sharing) erweitert.
- Es wird ein regionales Bike-Sharing-Angebot implementiert; die Agenten haben an jedem Ort ein Fahrrad zur Verfügung, unabhängig davon, ob innerhalb des vorangegangenen Weges ein Fahrrad verwendet wurde oder nicht.
- Es erfolgt die Implementierung einer multimodalen Routensuche.

Szenario “Deurbanisierung”

Das MURMO-Modell (Lengyel und Friedrich, 2019) sagt Wohnortwechsel innerhalb des Untersuchungsgebietes voraus, trifft jedoch keine Aussage darüber, wo die umgezogenen Personen nach dem Umzug arbeiten. Im MATSim Modell werden die Wohnorte der Agenten entsprechend angepasst. Es wird angenommen, dass (zufällig ausgewählte) $y\%$ der umgezogenen Personen in der Nähe des neuen Wohnortes arbeiten und die anderen $(100-y)\%$ den bisherigen Arbeitsplatz beibehalten. Mögliche Interpretationen dieser Dynamik sind:

- Personen ziehen in das Umland und arbeiten von dort aus im Home-Office.
- Firmen ziehen in das Umland und bieten gleichzeitig ihren Mitarbeitern lokal verfügbaren Wohnraum an.
- Gleichzeitig behält der Partner des umgezogenen Mitarbeiters den ursprünglichen Arbeitsort bei.

Zusätzlich werden flächendeckend innovative Verkehrsangebote, wie autonome geteilte Fahrzeuge und Sammeltaxis eingerichtet, um die Mobilität im suburbanen und ländlichen Raum zu gewährleisten.

Szenario “Gesellschaftliche Dynamiken”

Es handelt sich hier um einen Mix aus den bereits beschriebenen Szenarien. Es könnten folgende Maßnahmen umgesetzt werden:

- Einsatz von autonomen Fahrzeugen innerhalb des MIV
- Angebot von geteilten autonomen Fahrzeugen
- Angebot von autonomen Sammeltaxis
- Multimodales Verkehrsverhalten
- Umsetzung der RSV
- Dekarbonisierung sämtlicher Fahrzeuge

Die Szenarien werden der heutigen Situation gegenübergestellt, welche als “Base case” (Business as usual, Ist-Zustand) bezeichnet wird.

Referenzszenario „Base case“ (Ist-Zustand)

Der “Base case” (oder: Business as usual, Nullfall) bildet das heutige Verkehrsgeschehen in der Region Ruhr ab und entspricht damit der Basisversion des Ruhrgebiet-Verkehrsmodells (Ist-Zustand). Der “Base case” kann allerdings auch als Zukunftsszenario betrachtet werden, in dem auf gesellschaftlicher, politischer und technologischer Ebene keine großen Veränderungen erwartet werden (Referenzszenario). Vor dem Hintergrund einer etwas pessimistisch gedachten Zukunft werden bestehende Planungen, z.B. der RSV durch den RVR in der Basisversion “Base case” nicht betrachtet. Eine um die RSV erweiterte Version des “Base case” wird im Folgenden als “Base case - mit RSV” bezeichnet und in Abschnitt 4.2 analysiert.

In den Simulationsexperimenten in dieser Studie werden das Szenario “Gesunde und nachhaltige Stadt” und der “Base case” näher betrachtet.

4 Simulationsexperimente und -ergebnisse

4.1 Simulationsbasierte Szenariountersuchung

In einer ersten Reihe von Experimenten erfolgt die Simulation des Szenarios “Gesunde und nachhaltige Stadt” und “Base case”. Im Folgenden werden die Szenarien bzgl. ihres Modal Splits, der Reisezeitveränderungen sowie ihrer Umweltwirkungen miteinander verglichen.

Die Veränderung des Modal Split zeigt einen starken Rückgang des MIV von 36% auf 12% aller Fahrten. Gleichzeitig steigt der Anteil der Wege, die mit dem Fahrrad zurückgelegt werden von 10% auf 38%. Die personenfeine Betrachtung zeigt, dass der Großteil der Fahrradnutzer im Szenario “Gesunde und nachhaltige Stadt” zuvor den MIV genutzt hat. Weiterhin wechselt eine signifikante Zahl an Nutzern von dem ÖV und zu Fuß gehen auf das Fahrrad. Auf den ÖV wechseln primär Nutzer, die zuvor mit dem MIV unterwegs waren. Eine hohe Zahl an Nutzern verbleibt innerhalb des zuvor ausgewählten Verkehrsmittels. Eine vernachlässigbare Zahl an Nutzern wechselt zudem in die Gegenrichtung, z.B. vom Fahrrad auf den MIV, was primär auf das stochastische Nutzerverhalten zurückgeführt werden kann. Je nachdem welcher Typ von Verkehrsmittelwechsel stattfindet, verlangsamen oder beschleunigen sich die individuelle Nutzer. Für Nutzer, die sowohl im “Base case” als auch im Szenario “Gesunde und nachhaltige Stadt” das Fahrrad genutzt haben verkürzt sich die durchschnittliche Reisezeit pro Weg um ca. 3 Minuten. Dies ist auf die verbesserte Fahrradinfrastruktur, konkret die Errichtung der RSV sowie zusätzlicher Radwege, zurückzuführen. Nutzer, die von gewöhnlich schnelleren Verkehrsmitteln, wie dem MIV auf das Fahrrad wechseln sind pro Weg im Mittel ca. 21 Minuten länger unterwegs. Nutzer, die zuvor den ÖV genutzt haben und im Szenario “Gesunde und nachhaltige Stadt” das Fahrrad nutzen, sind pro Weg durchschnittlich knapp 5 Minuten länger unterwegs. Verbleibende Nutzer innerhalb des ÖVs benötigen aufgrund des dichteren Takts im Szenario “Gesunde und nachhaltige Stadt” ca. 3 Minuten weniger pro Weg.

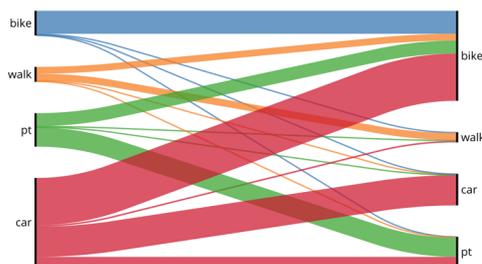


Abb. 5: Verkehrsmittelwechsel: Base case (links) → Gesunde und nachhaltige Stadt (rechts)

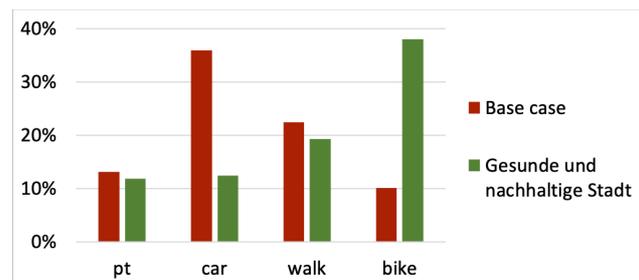


Abb. 6: Modal Split: Base case vs. Gesunde und nachhaltige Stadt

Die Betrachtung der Verkehrsstärken für die Verkehrsmittel Fahrrad und MIV in den folgenden Abbildungen zeigt eine deutliche Veränderung der Netzbelastungen. Während sich im “Base case” der Radverkehr eher clusterartig auf größere Ballungszentren konzentriert, entwickelt sich das Fahrrad im Szenario “Gesunde und nachhaltige Stadt” zu einem stark im regionalen Kontext genutzten Verkehrsmittel. Auffällig ist auch die starke Nutzung der RSV. Die durchschnittliche Reisesweite pro zurückgelegtem Weg mit dem Fahrrad steigt im Szenario

“Gesunde und nachhaltige Stadt” von 4,5 km auf 7,9 km. Die Betrachtung der Netzbelastung durch den MIV zeigt keine starke strukturelle Veränderung. Auf kleineren Nebenstraßen ist der MIV nicht mehr zugelassen und der Verkehr konzentriert sich, wenn auch auf einem weit geringeren Niveau, weiterhin auf die Autobahnen und Hauptverkehrsstraßen.

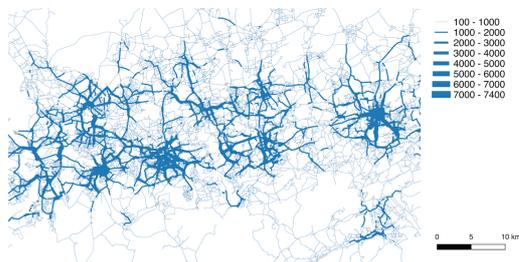


Abb. 7: Base case: Tägliche Verkehrsstärke (Fahrrad)

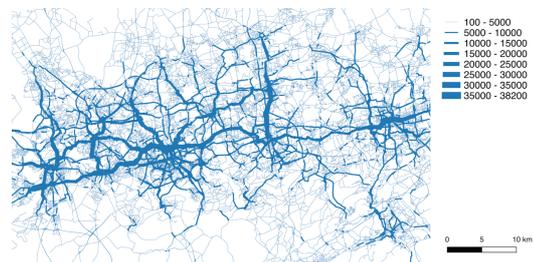


Abb. 8: Gesunde und nachhaltige Stadt: Tägliche Verkehrsstärke (Fahrrad); andere Skalierung als in Abb. 7

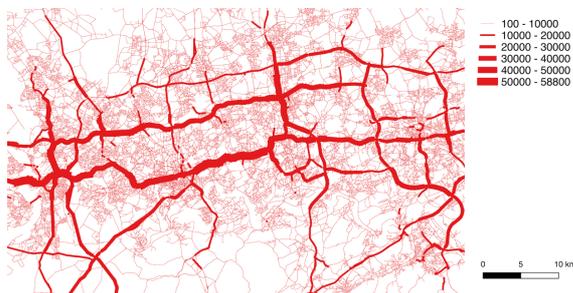


Abb. 9: Base case: Tägliche Verkehrsstärke (MIV)

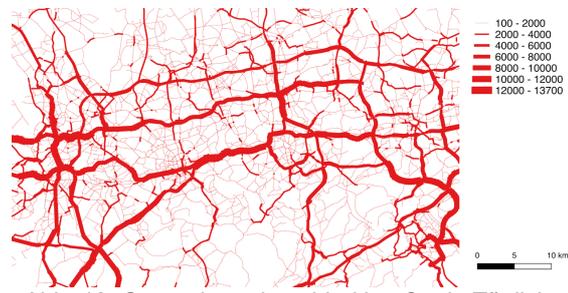


Abb. 10: Gesunde und nachhaltige Stadt: Tägliche Verkehrsstärke (MIV); andere Skalierung als in Abb. 9

Wie die folgenden Abbildungen deutlich zeigen, ist eine deutliche Abnahme der verkehrlichen Umweltwirkungen zu registrieren. Aus der stark reduzierten MIV-Nachfrage resultiert im Szenario “Gesunde und nachhaltige Stadt” in eine starke Abnahme des Lärmpegels für die Berechnungspunkte entlang der meisten Straßen auf unterhalb von 50 dB(A), lediglich entlang der Autobahn sowie unmittelbar an Hauptverkehrsstraßen sind weiterhin höhere Lärmpegel zu verzeichnen. Die Berechnung der Lärmpegel basiert dabei auf einer vereinfachten Berechnung nach der Methodik der RLS 90 (FGSV 1992) innerhalb der Verkehrssimulationssoftware MATSim (Kaddoura, Kröger und Nagel 2017).

Auch die NO_x-Emissionen nehmen im gesamten Ruhrgebiet stark ab. Eine deutliche Verbesserung der Luftqualität ist insbesondere entlang der Autobahn zu beobachten. Abseits der Autobahn betragen die täglichen NO_x-Emissionen weniger als 100g pro ha. Diese Berechnung basiert auf HBEFA-Daten (Infras 2010) und einer ebenfalls innerhalb von MATSim implementierten Luftschadstoffemissionsberechnung (Kickhöfer et al. 2013; Hülsmann et al. 2011).

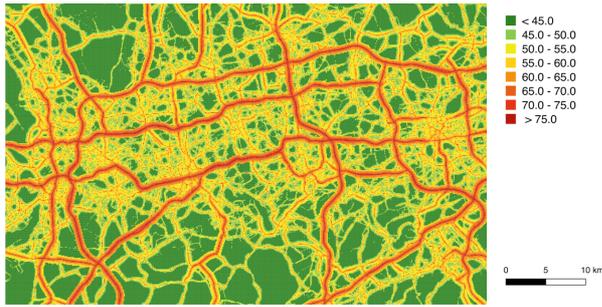


Abb. 11: Base case: MIV-bedingte Lärmpegel (day-evening-night index; vereinfachte Berechnung nach RLS 90; Tunnel werden vernachlässigt) [dB(A)]; Ruhrgebiet



Abb. 12: Gesunde und nachhaltige Stadt: MIV-bedingte Lärmpegel (day-evening-night index; vereinfachte Berechnung nach RLS 90; Tunnel werden vernachlässigt) [dB(A)]; Ruhrgebiet

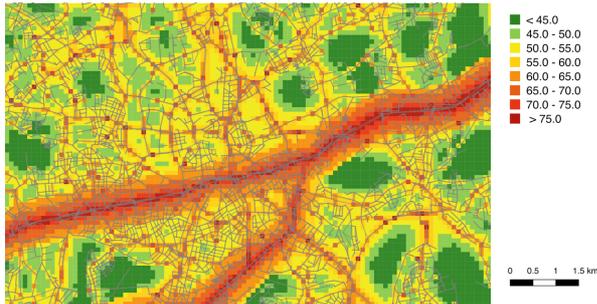


Abb. 13: Base case: MIV-bedingte Lärmpegel (day-evening-night index; vereinfachte Berechnung nach RLS 90; Tunnel werden vernachlässigt) [dB(A)]; Essen

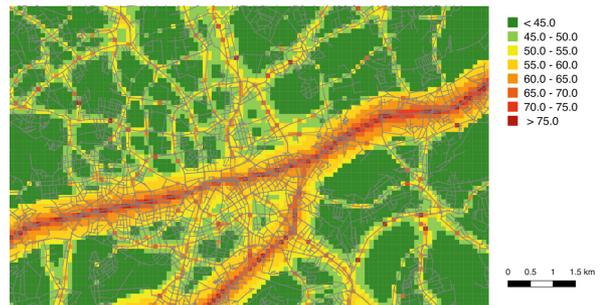


Abb. 14: Gesunde und nachhaltige Stadt: MIV-bedingte Lärmpegel (day-evening-night index; vereinfachte Berechnung nach RLS 90; Tunnel werden vernachlässigt) [dB(A)]; Essen

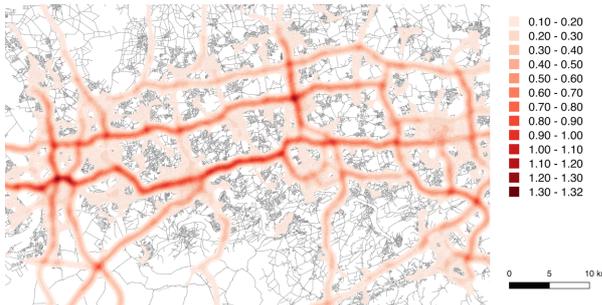


Abb. 15: Base case: MIV-bedingte NOx-Emissionen (vereinfachte räumliche Ausbreitung) [kg pro ha und Tag]; Ruhrgebiet

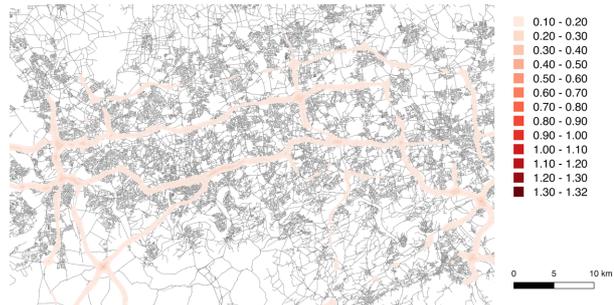


Abb. 16: Gesunde und nachhaltige Stadt: MIV-bedingte NOx-Emissionen [kg pro ha und Tag]; Ruhrgebiet

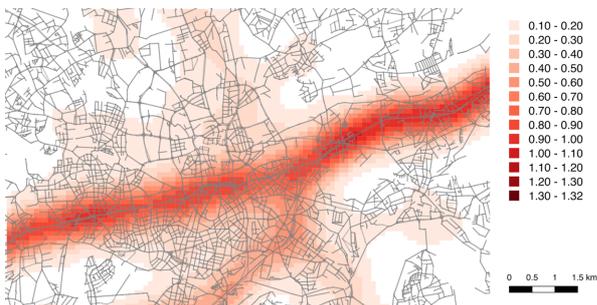


Abb. 17: Base case: MIV-bedingte NOx-Emissionen (vereinfachte räumliche Ausbreitung) [kg pro ha und Tag]; Essen



Abb. 18: Gesunde und nachhaltige Stadt: MIV-bedingte NOx-Emissionen (vereinfachte räumliche Ausbreitung) [kg pro ha und Tag]; Essen

4.2 Szenariobasierte Maßnahmenuntersuchung

In einer zweiten Reihe von Simulationsexperimenten wird die Wirkung der Maßnahme "Errichtung der RSV" innerhalb des "Base case" sowie des Szenarios "Gesunde und nachhaltige Stadt" betrachtet.

4.2.1 "Base case" vs. "Base case - mit RSV"

Die Implementierung der RSV innerhalb des "Base case" führt zu einer Zunahme der Fahrradwegeanteils von 10% ("Base case") auf 14% ("Base case - mit RSV") aller Wege. Neunutzer innerhalb des Verkehrsmittels Fahrrad nutzten zuvor insbesondere den MIV sowie in geringerem Maße auch den ÖV oder waren zu Fuß unterwegs. Eine interessante Beobachtung ist, dass ca. 247.000 Nutzer vom ÖV auf den MIV wechseln, ca. 40.000 mehr als vom MIV auf den ÖV. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund der RSV viele Nutzer vom MIV auf das Fahrrad wechseln, was zu einer Reduzierung der Stauwirkung und Attraktivitätssteigerung des MIV führt.

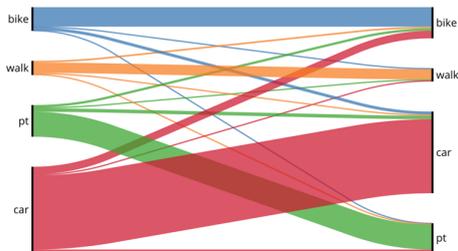


Abb. 19: Verkehrsmittelwechsel: Base case (links) → Base case - mit RSV (rechts)

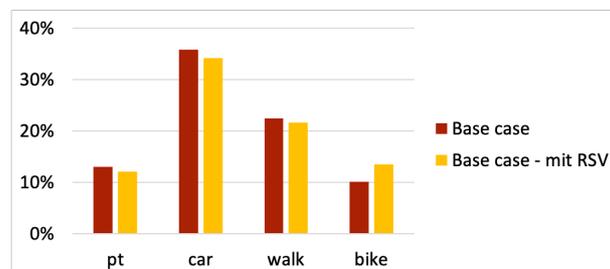


Abb. 20: Modal Split: Base case vs. Base case - mit RSV

Nutzer, die sowohl im "Base case" als auch im "Base case - mit RSV" das Fahrrad nutzen, verbessern sich um durchschnittlich 113 Sekunden pro Weg. Für insgesamt 1.385.000 Wege, die in diese Kategorie fallen, ergibt sich daraus eine Fahrzeiterparnis von 43.474 Personenstunden pro Tag. Wechsler vom MIV auf das Fahrrad sind pro Weg im Mittel ca. 13 Minuten länger unterwegs. Nicht nur Fahrradnutzer profitieren von der Maßnahme, verbleibende Nutzer innerhalb des MIV verbessern sich um durchschnittlich ca. 20 Sekunden pro Weg, was auf die insgesamt reduzierte MIV-Nachfrage und verringerte Stauwirkung zurückzuführen ist.

Ein Vergleich der täglichen Verkehrsstärken für das Verkehrsmittel Fahrrad zeigt eine deutliche Zunahme des Fahrradverkehrsaufkommens. Die RSV werden primär im Bereich einzelner Ballungszentren genutzt sowie für Wege zwischen nahe beieinander gelegenen Ballungszentren, z.B. im Raum Mülheim und Oberhausen. Die durchschnittliche Reiseweite mit dem Fahrrad steigt von 4,5 km auf 5,3 km pro Weg.

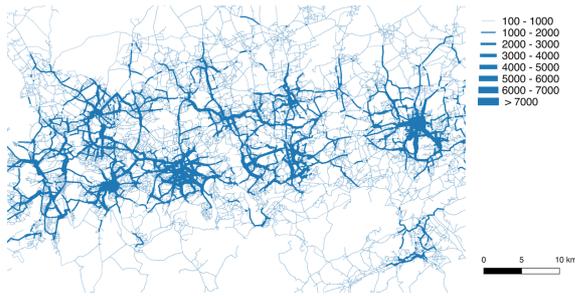


Abb. 21: Base case: Tägliche Verkehrsstärke (Fahrrad)

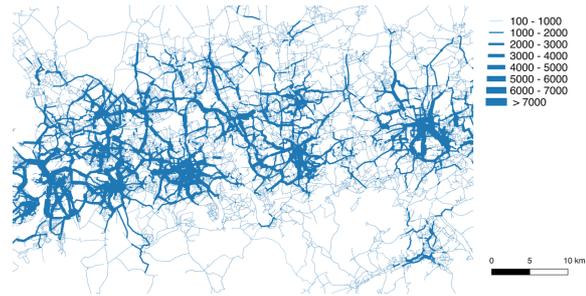


Abb. 22: Base case - mit RSV: Tägliche Verkehrsstärke (Fahrrad)

4.2.2 “Gesunde und nachhaltige Stadt - ohne RSV” vs. “Gesunde und nachhaltige Stadt”

Die Untersuchung der Maßnahme “Errichtung der RSV” innerhalb des Szenarios “Gesunde und nachhaltige Stadt” zeigt, dass die RSV trotz insgesamt stark verbesserter Fahrradinfrastruktur und Einschränkungen innerhalb des MIV eine starke verkehrliche Wirkung hat und weiteren Verkehr primär vom MIV auf das Fahrrad verlagert. Ohne Implementierung der RSV beträgt der Wegeanteil des Verkehrsmittels Fahrrad 34% statt 38%. Nutzer, die bereits ohne Implementierung der RSV das Fahrrad nutzen werden um durchschnittlich 173 Sekunden pro Weg beschleunigt. Für diese Nutzer ergibt sich damit eine Reisezeitersparnis von 240.802 Personenstunden pro Tag. Aufgrund der deutlich höheren Zahl an Fahrradnutzern innerhalb des Szenarios “Gesunde und nachhaltige Stadt - ohne RSV” ist der Nutzen der Maßnahme “Errichtung der RSV” deutlich höher als im “Base case”. Die durchschnittliche Reiseweite mit dem Fahrrad steigt von 7,3 km auf 7,9 km pro Weg. Auch hier profitieren nicht nur die Fahrradnutzer von der Implementierung der RSV, denn für innerhalb des MIV verbleibende Nutzer reduziert sich die durchschnittliche Reisezeit um 25 Sekunden pro Weg.

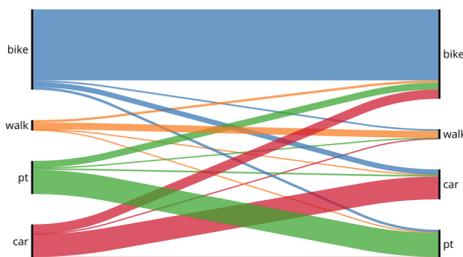


Abb. 23: Verkehrsmittelwechsel: Gesunde und nachhaltige Stadt - ohne RSV (links) → Gesunde und nachhaltige Stadt (rechts)

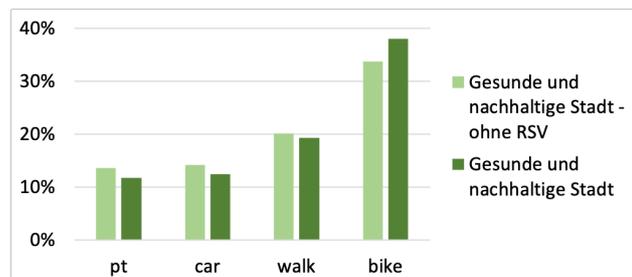


Abb. 24: Modal Split: Gesunde und nachhaltige Stadt - ohne RSV vs. Gesunde und nachhaltige Stadt

4.3 Sensitivitätsanalyse: Szenario-Teilumsetzung

In einer dritten Reihe von Simulationsexperimenten wird das Szenario “Gesunde und nachhaltige Stadt” näher analysiert und in verschiedenen Teilumsetzungen betrachtet. Damit soll grob untersucht werden, welche Maßnahme innerhalb des Maßnahmenbündels des Szenarios “Gesunde und nachhaltige Stadt” welchen konkreten Einfluss hat.

Sortiert nach dem Wegeanteil des Fahrrads stellt die folgende Abbildung den Modal Split des "Base case", der Szenario-Teilumsetzungen sowie des Szenarios "Gesunde und nachhaltige Stadt" dar.

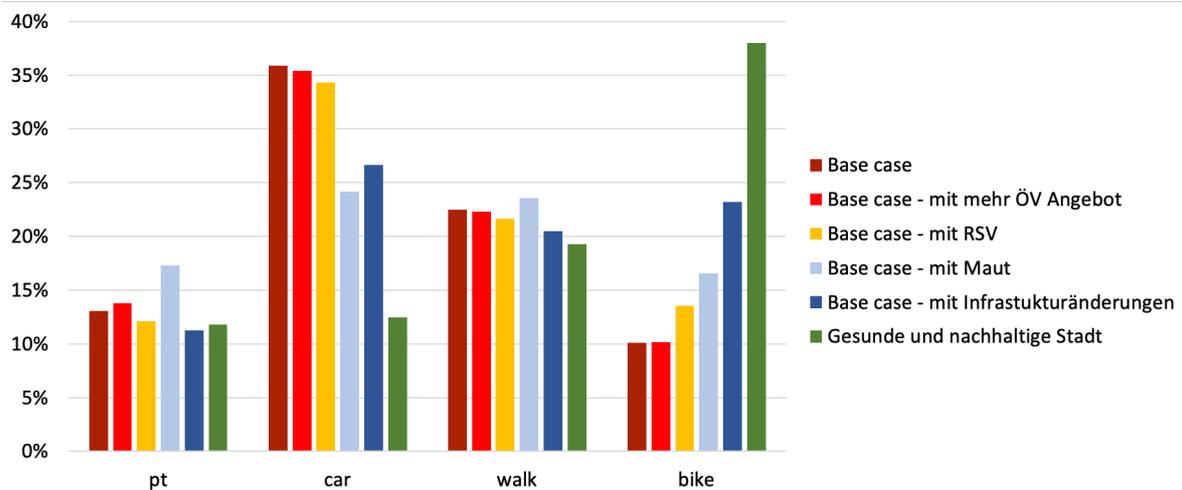


Abb. 25: Modal Split je Szenario bzw. Szenario-Teilumsetzung

Die alleinige Verbesserung des ÖV-Angebots zeigt nur eine geringe Wirkung, was darauf zurückzuführen ist, dass Kapazitätsbeschränkungen innerhalb des ÖVs sowie der erhöhte Komfort aufgrund geringer ausgelasteter Fahrzeuge nicht modellseitig berücksichtigt werden. Aufgrund verkürzter Wartezeiten ist der ÖV dennoch attraktiver und der Wegeanteil des ÖV erhöht sich um ca. 1%. Die alleinige Implementierung des RSV zeigt die in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Wirkung eines höheren Wegeanteils des Fahrradverkehrs von 14% statt 10%. Die alleinige Erhebung einer Maut in Höhe von 0,20 EUR pro km verlagert den Verkehr vom MIV auf primär den ÖV und das Fahrrad. Der Wegeanteil des Fahrradverkehrs beträgt 17%. Eine noch stärkere Wirkung hat die alleinige Umsetzung der infrastrukturellen Änderungen (Sperrung der Wohnstraßen für den MIV und Umwidmung von Straßenkapazität für den Fahrradverkehr). Hier steigt der Wegeanteil des Fahrradverkehrs auf 23%.

Die gleichzeitige Implementierung sämtlicher Maßnahmen innerhalb des Szenarios "Gesunde und nachhaltige Stadt" überlagert die beobachteten Wirkungen der Szenario-Teilumsetzungen und führt wie in Abschnitt 4.1 beschrieben zum höchsten Wegeanteil des Fahrradverkehrs von 38%. Es zeigt sich damit, dass die Maßnahmen super-additiv auf den Fahrradverkehr wirken, also in Kombination eine noch stärkere Wirkung haben, als eine Aufsummierung der einzelnen Teilumsetzungen erwarten lassen würde.

5 Diskussion

Eine Alternative zum verwendeten Annahmen-basierten und nicht-integrierten Ansatz der simulationsbasierten Zukunftsforschung stellt die Verwendung eines integrierten Raumstruktur- und Verkehrsmodellierungsansatzes dar, bei welchem die Entwicklung der Raumstruktur, die Nutzung des Verkehrssystems sowie insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Raumstruktur (Land Use) und Verkehrssystem explizit nachgezeichnet werden. Diese Wechselwirkungen werden häufig mit dem Konzept des Land-Use-Transport-Interaction-Cycle beschrieben, welcher zum Ausdruck bringt, dass einerseits die Auslastung

des Verkehrssystems aus der Raumnutzung resultiert und insofern durch geänderte Raumnutzung Änderungen erfährt. Andererseits wird aufgegriffen, dass sich durch die Auslastung des Verkehrssystems die Erreichbarkeiten von Orten ändern, wodurch wiederum die Entwicklung der (Flächen-)Nutzung dieser Orte beeinflusst wird (Wegener 2014, 2004).

Während in der vorliegenden Studie sämtliche Änderungen der Raumstruktur über Annahmen abgebildet werden, würde ein integrierter Raumstruktur- und Verkehrsmodellierungsansatz Entwicklungen der Flächennutzung sowie die zugrundeliegenden Änderungen der Bevölkerung (Zuzug, Wegzug, demografische Entwicklung), Grundstückspreise, Erreichbarkeiten, die sich in Zusammenhang mit der Entwicklung des Verkehrssystems ergeben, sowie ggf. weiterer Aspekte, explizit modellseitig darstellen. Im Kontext aggregierter (makroskopischer) Verkehrsmodelle (Vier-Stufen-Modelle) bestehen hierzu verschiedene Modelle. Ein mikroskopisches Land-Use-Modell, bei dem – analog zur personenfeinen Simulation des Verkehrs in MATSim – auf Ebene des Individuums demografische Veränderungen und raumbezogene Entscheidungen wie die Wohnstandortwahl modelltechnisch abgebildet werden, besteht in SILO⁵. Ein integriertes Modell, welches dieses mikroskopischen Land-Use-Modell mit dem in dieser Studie verwendeten mikroskopischen Verkehrsmodell MATSim auf personenbezogener Ebene verknüpft, befindet sich in einem parallel laufenden Projekt aktuell in Entwicklung (Ziemke, Nagel und Moeckel 2016). Ein Vorteil eines personenfeinen integrierten Ansatzes ist, dass stärker diversifiziertes Mobilitätsverhalten (z.B. atypische Arbeits- und somit Wegestartzeiten oder Präferenzen bzgl. Verkehrsmitteln) sowie diversifiziertere Mobilitätsangebote (z.B. neue Verkehrsmittel wie geteilte autonome Fahrzeuge), wie sich bereits in MATSim modellseitig abgebildet werden, in die hiervon beeinflussten, raumbezogenen Entscheidungen (z.B. Wohnstandortwahl) auf kohärente Art und Weise einbezogen werden können. Dies geschieht dadurch, dass das modellierte Individuum bei raumbezogenen Entscheidungen (auf Seiten des Land-Use-Modells) hierfür relevante Informationen bzgl. der Mobilität (bspw. Fahrzeit zur Arbeit zu einer präferierten Uhrzeit mit einem bestimmten Verkehrsmittel) abfragen kann.

Der in dieser Studie verwendete Annahmen-basierte und nicht-integrierte Ansatz bietet hingegen die Vorteile einer einfachen Anwendbarkeit sowie einer hohen Flexibilität bzgl. szenariospezifischer Annahmen und Maßnahmen sowie bzgl. veränderter Rahmenbedingungen. Das Verkehrssimulationsmodell kann relativ flexibel auf Basis getroffener Annahmen angebotsseitig (z.B. Einführung von geteilten autonomen Taxis, Ausbau der Radschnellwegeinfrastruktur) bzw. nachfrageseitig (z.B. Veränderung von Wohn- und Arbeitsorten, Veränderung von Verhaltensparametern) angepasst und untersucht werden.

Modellbasierte Untersuchungen von Radschnellwegen in Patna, Indien (Agarwal, Ziemke und Nagel 2017), zeigen eine deutlich andere Wirkung als die in Abschnitt 4.2 beschriebene Verlagerung. Während in dieser Studie primär eine Verlagerung vom MIV auf das Fahrrad zu beobachten ist, zeigen die Simulationsergebnisse in Agarwal, Ziemke und Nagel (2017) primär ein starkes Verlagerungspotential für Fußgänger und den ÖV auf das Fahrrad.

In dieser Studie ergibt sich die Attraktivität der RSV allein aus einer Verkürzung der Reisezeit. Auf RSV beträgt die Reisegeschwindigkeit 25 km/h, wohingegen Radfahrer im übrigen Netz

⁵ Simple Integrated Land Use Orchestrator, www.silo.zone

nur halb so schnell unterwegs sind. Diese Annahme mag für E-Bikes plausibel sein, kann aber auch für konventionelle Fahrräder als eine Reduzierung der wahrgenommenen Kosten aufgrund eines höheren Sicherheitsgefühls und Fahrkomforts interpretiert werden. Ein alternativer Ansatz stellt die explizite Berücksichtigung weiterer nachfrageseitig relevanter Kostenkomponenten dar (Livingston et al. 2019; Ziemke, Metzler und Nagel 2019).

6 Fazit und Ausblick

Insgesamt bietet die simulations- bzw. modellbasierte Zukunftsforschung den Vorteil einer detaillierten Untersuchung von Szenarien bzgl. ihrer Verkehrs- und Umweltwirkung. Dies ermöglicht, dass szenario-spezifische Chancen und Herausforderungen aufgezeigt und quantifiziert werden können. Die Simulationsergebnisse für die Region Ruhr erlauben den konkreten Vergleich des heutigen Verkehrsgeschehens mit der möglichen zukünftigen Entwicklung innerhalb des Szenarios "Gesunde und nachhaltige Stadt". Die Simulationsexperimente zeigen eine starke Verlagerungswirkung vom MIV auf den Fahrradverkehr. NOx-Emissionen und Lärmpegel weisen ein signifikant geringeres Niveau auf. Damit liegen konkrete Ergebnisse vor, die in zukünftigen Studien für die Bewertung des Szenarios "Gesunde und nachhaltige Stadt" bzgl. der Lebensqualität und Gesamtwohlfahrt verwendet werden können.

Weiterhin lassen sich konkrete Maßnahmen für verschiedene Szenarien bzgl. ihrer Wirtschaftlichkeit untersuchen. Die simulationsbasierte Szenariountersuchung kann daher auch als Tool verstanden werden, mit dem man Maßnahmen auf ihre Robustheit bzgl. verschiedener möglicher Zukunftsentwicklungen untersuchen kann. Demnach sollte eine Maßnahme, die in sämtlichen als plausibel eingestuften Szenarien eine hohe Wirtschaftlichkeit aufweist, gegenüber einer Maßnahme, die nur in bestimmten Szenarien eine hohe Wirtschaftlichkeit zeigt, bevorzugt werden. Die Simulationsexperimente für die Region haben gezeigt, dass die Implementierung der RSV im "Base case" (Ist-Zustand) als auch im Zukunftsszenario "Gesunde und nachhaltige Stadt" zu einer starken Einsparung von Reisezeiten beiträgt und den Wegegenanteil des Fahrradverkehrs signifikant erhöht.

In zukünftigen Studien werden auch die weiteren Szenarien "Smart city", "Deurbanisierung" und "Gesellschaftliche Dynamiken" simulationsbasiert umgesetzt und untersucht. Verkehrliche Analysen werden dabei unter anderem auch die Veränderung der Erreichbarkeit in der Region betrachten. Die Szenarien werden zudem einander gegenübergestellt und unter Einbeziehung weiterer Analysen, z.B. bzgl. raumstruktureller Entwicklungen und veränderter Erreichbarkeiten, bewertet.

Danksagung

Die Autoren danken Gregor Rybczak, Karoline Führer und Zhuoxiao Meng für die Zuarbeit und programmieretechnische Unterstützung. Außerdem danken die Autoren dem Regionalverband Ruhr für die Bereitstellung der Erhebungsdaten (MiD 2017) und GIS-Planungsdaten der RSV (Entwurfssfassung).

Literaturverzeichnis

- Agarwal, A., D. Ziemke und K. Nagel. 2017. „Bicycle superhighway: an environmentally sustainable policy for urban transport“.
- Agarwal, A., M. Zilske, K. R. Rao und K. Nagel. 2015. „An elegant and computationally efficient approach for heterogeneous traffic modelling using agent based simulation“. *Procedia computer science* 52 (C): 962–67.
- Bishop, Peter, Andy Hines und Terry Collins. 2007. „The current state of scenario development: an overview of techniques“. *Foresight*. <https://doi.org/10.1108/14636680710727516>.
- Börjeson, L., M. Höjer, K.-H. Dreborg, T. Ekvall und G. Finnveden. 2006. „Scenario types and techniques: Towards a user’s guide“. *Futures*. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>.
- Bundesagentur für Arbeit. 2010. „Pendlerstatistik 2010“. Nürnberg: Bundesagentur für Arbeit.
- FGSV. 1992. Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS), Ausgabe 1990, Berichtigte Fassung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- Gawron, C. 1998. „An Iterative Algorithm to Determine the Dynamic User Equilibrium in a Traffic Simulation Model“. *International Journal of Modern Physics C* 9 (3): 393–407.
- Horni, A., K. W. Axhausen und K. Nagel, Hrsg. 2016. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity, London.
- Hülsmann, F., R. Gerike, B. Kickhöfer, K. Nagel und R. Luz. 2011. „Towards a multi-agent based modeling approach for air pollutants in urban regions“. In *Conference on „Luftqualität an Straßen“*, 144–66. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Infras. 2010. „Handbook Emission Factors for Road Transport 3.1“. INFRAS Zurich Switzerland. www.hbefa.net.
- Kaddoura, I., L. Kröger und K. Nagel. 2017. „An activity-based and dynamic approach to calculate road traffic noise damages“. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 54: 335–47.
- Kickhöfer, B., F. Hülsmann, R. Gerike und K. Nagel. 2013. „Rising car user costs: comparing aggregated and geo-spatial impacts on travel demand and air pollutant emissions“. In *Smart Transport Networks: Decision Making, Sustainability and Market structure*, herausgegeben von T. Vanoutrive und A. Verhetsel, 180–207. NECTAR Series on Transportation and Communications Networks Research. Edward Elgar Publishing Ltd.
- Lengyel, J. und J. Friedrich. 2019. „Multiskalen-Stadtmodellierung am Beispiel eines Deurbanisierungsszenarios im Ruhrgebiet.“ 11. Wissenschaftsforum 2019. Universität Duisburg-Essen.
- Livingston, C. L., I. B. Bartana, D. Ziemke und F. Bahamonde-Birke. 2019. „The Influence of the Route Environment on the Route Choice of Bicyclists -- A Preliminary Study“. VSP Working Paper 19-09. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik.
- Melkonyan, A., J. Koch, V. Kamath, F. Lohmar, V. Munteanu und A. Schmidt. „Integrated Urban Planning Policies for Sustainable Mobility Transformation in Metropole Regions: A System Dynamic Approach“. 2019. In Bearbeitung.
- Nagel, K. und G. Flötteröd. 2012. „Agent-based traffic assignment: Going from trips to behavioural travelers“. In *Travel Behaviour Research in an Evolving World -- Selected papers from the 12th international conference on travel behaviour research*, herausgegeben von R. M. Pendyala und C. R. Bhat, 261–94. International Association for Travel Behaviour Research.
- Pinjari, A., N. Eluru, R. Copperman, I. Sener, J. Guo, S. Srinivasan und C. Bhat. 2006. „Activity-Based Travel-Demand Analysis for Metropolitan Areas in Texas: CEMDAP Models, Framework, Software Architecture and Application Results“. Center for Transportation Research at the University of Texas.
- Schmidt, J. A. und S. Klemm. 2019. „Integrative Szenarien für eine nachhaltige Mobilität in der Region Ruhr“. 11. Wissenschaftsforum 2019. Universität Duisburg-Essen.

- Steinmüller, K. 1997. "Grundlagen und Methoden der Zukunftsforschung: Szenarien, Delphi, Technikvorausschau." SFZ-WerkstattBericht 21. Sekretariat für Zukunftsforschung gGmbH. Gelsenkirchen.
- Varho, V. und P. Tapio. 2013. „Combining the qualitative and quantitative with the Q2 scenario technique — The case of transport and climate“. Technological Forecasting and Social Change. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.09.004>.
- Wegener, M. 2004. „Overview of land-use transport models“. In Transport Geography and Spatial Systems, herausgegeben von K. ;. Hensher D.A.; Button, 127–46. Handbook in Transport. Pergamon/Elsevier Science.
- . 2014. „Land-Use Transport Interaction Models“. In Handbook of Regional Science, herausgegeben von M. Fischer und P. Nijkamp, 741–58. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Ziemke, D., A. Agarwal und I. Kaddoura. 2018. „Entwicklung eines regionalen, agentenbasierten Verkehrssimulationsmodells zur Analyse von Mobilitätszenarien für die Region Ruhr“. In 10. Wissenschaftsforum Mobilität : Mobility in Times of Change -- Past, Present, Future.
- Ziemke, D., I. Kaddoura und K. Nagel. 2019. „The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data“. Procedia computer science forthcoming.
- Ziemke, D., K. Nagel und C. Bhat. 2015. „Integrating CEMDAP and MATSim to increase the transferability of transport demand models“. Transportation research record 2493: 117–25.
- Ziemke, D., S. Metzler und K. Nagel. 2019. „Bicycle traffic and its interaction with motorized traffic in an agent-based transport simulation framework“. Future Generation Computer Systems 97: 30-40.
- Ziemke, D., K. Nagel und R. Moeckel. 2016. „Towards an Agent-based, Integrated Land-use Transport Modeling System“. Procedia computer science 83: 958–63.