

Bachelorarbeit

Fahrdynamik von Fahrrädern in Gefällestrecken

Sebastian Spreitzer-Gröbner

Datum: 23.06.2020

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird auf die Frage eingegangen, wie sich Fahrräder in Gefällestrecken verhalten. Wird dabei bergauf oder bergab mehr Platz benötigt? Nach einem kurzen theoretischen Teil zur Fahrdynamik wird im Weiteren durch Videoanalysen der Geschwindigkeitsunterschied und das damit verbundene Fahrverhalten auf bergab und bergauf geführten Radwegen untersucht. Dabei erfolgt die Ermittlung der Geschwindigkeiten mittels Stoppuhr. Das Fahrverhalten wird mithilfe einer konstruierten Rasterfläche, die in den Videos eingebettet ist, analysiert. Danach werden die Ergebnisse verglichen. Dadurch wird ersichtlich, dass es einen Unterschied macht, ob in einem Gefälle bergauf oder bergab gefahren wird. Es wird bergauf fahrend mehr Platz benötigt als bergab fahrend. Diese Unterschiede werden umso deutlicher, je größer das Gefälle oder die Steigung wird.

1 Einleitung

In Zeiten der stark ansteigenden CO₂-Emissionen, des Klimawandels, rückt generell und vor allem in Großstädten die aktive Mobilität als Potenzial des Klimaschutzes immer mehr in den Fokus [1, 2]. Aktive Mobilität wie Gehen und Radfahren wird immer wichtiger. Einige Städte in Europa, wie Sevilla, Bilbao oder Gent haben sich dieser Aufgabe angenommen und durch verschiedene Konzepte den Radverkehr im urbanen Raum gefördert [1]. Auch in Wien steigt der Bedarf an Radverkehrswegen stetig an, da der Radverkehr immer mehr an Bedeutung gewinnt [3]. Durch erhöhtes Verkehrsaufkommen wird die Frage des Platzbedarfes und der Dynamiken im Radverkehr immer wichtiger. So auch im Speziellen die Fahrdynamik von Fahrrädern in Gefällestrecken und dem damit verbundenen Unterschied des Platzbedarfes der bergauf- bzw. bergabfahrenden Verkehrsteilnehmer auf baulich getrennten Einrichtungsradwegen. Die nachfolgende Arbeit beschäftigt sich mit diesem Umstand des Platzbedarfes infolge der Fahrdynamik und versucht die Notwendigkeit abzuschätzen. Ist es erforderlich einen baulich getrennten Einrichtungsradweg aufgrund der Fahrdynamik in Gefällestrecken in Zukunft breiter zu gestalten, um dadurch mehr Platz zur Verfügung zu stellen?

2 Definitionen und Erläuterungen

2.1 Fahrdynamik des Fahrrades

Bevor auf die Fahrdynamik in Gefällestrucken näher eingegangen werden kann, wird im Folgenden versucht, kurz die Stabilität des Fahrrades in einem physikalischen Exkurs zu erläutern.

Wilfried Suhr und H. Joachim Schlichting von der Universität Münster in Deutschland schaffen das eher komplexe Thema der Physik des Fahrrades auf sehr anschauliche Art und Weise in ihrem Artikel „Gleichgewicht auf zwei Rädern“ darzustellen [5].

In **Abb. 1** ist die Modellbildung ersichtlich. Dabei handelt es sich um ein Fahrrad (grau auf gelbem Hintergrund) auf einer vollkommen ebenen Fahrbahn, welches durch die schwarze Konstruktion in ein Ersatzsystem übergeführt wird. Dabei ersichtlich sind die geometrischen Parameter Radstand O , Nachlauf N und Steuerkopfwinkel β . Der Kippwinkel κ und der Lenkwinkel ϕ beschreiben die Drehung der Lenkachse bzw. des Rahmens aus der Ebene. Um in weiterer Folge die Gleichgewichtslage beschreiben zu können wird angenommen, dass die Winkel ϕ und κ sehr klein sind. Ebenfalls im Ersatzsystem ist die Lage des Schwerpunktes ersichtlich, der die Zusammenfassung der Massen aller Fahrradkomponenten inklusive der Fahrer Masse bildet. Die Lage des Schwerpunktes wird durch die Knoten h und s definiert [5].

In Gleichgewichtslage bleibt das Fahrrad nun nur, wenn es keine Beschleunigung in eine seiner Bewegungsrichtungen erfährt. „Das Fahrrad hat fünf [Bewegungsrichtungen oder, Anm. S.S.-G.] Freiheitsgrade der Lage im Raum (zwei Koordinaten für die Berührungspunkte der Räder mit dem Boden, zwei Koordinaten für die Lage der Rahmenebene, eine Koordinate für die Verdrehung der Vorderradebene gegen die Rahmenebene).“ [6]

Allerdings sind nur drei Freiheitsgrade für die Gleichgewichtslage von Bedeutung. Das ist zum Ersten die Schiefstellung der Vorderradebene gegenüber der Hinterradebene aufgrund der Auslenkung des Lenkwinkels ϕ . Zum Zweiten das Kippen um die Kippachse. Jene Achse, die die Verbindung der beiden Radaufstandspunkte beschreibt. In **Abb. 1** ist diese durch die Drehung des Winkels κ ersichtlich. Die dritte Bewegungsmöglichkeit ist die „horizontale Verschiebung des Fahrrades auf der Unterlage, gebunden an die Rollrichtung der Räder.“ [5]

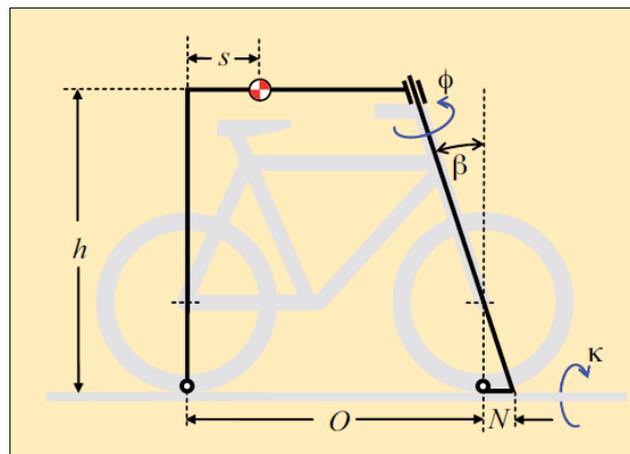


Abb. 1: Fahrradmodell [5]

Vereinfacht lässt sich nun sagen, dass bei konstantem κ und ϕ die Gleichgewichtslage vorhanden ist. Dies bedingt, dass sich das Fahrrad auf einer Kreisbahn um einen Bahnmittelpunkt bewegt (siehe dazu **Abb. 2**). Dadurch, dass unter der Annahme des nicht vorhandenen Rollwiderstandes das Fahrrad auf der Kreisbahn mit konstanter Geschwindigkeit fährt, ist zu untersuchen welche Kräfte die Lenk- und Kippbewegungen hervorrufen können [5].

„Eine Beschleunigung dieser Drehbewegungen [Lenk- und Kippbewegung, Anm. S.S.-G.] wird durch Drehmomente hervorgerufen, die jeweils in Richtung von Kipp- oder Lenkachse wirken. Die Suche nach einer Gleichgewichtslage entspricht also der Suche nach einer Kombination von ϕ und κ , bei der diese beiden Drehmomente verschwinden. Da sich beide Drehmomente aber aus unterschiedlichen Beiträgen zusammensetzen, ist dies nur möglich, wenn sich alle jeweils in Richtung von Kipp- und Lenkachse wirkenden Beiträge gegenseitig aufheben.“ [5]

In **Abb. 2** sind die jeweiligen Beiträge bestehend aus den statischen Kräften (blaue Vektorpfeile), die in vertikale Richtung weisen und den dynamischen Kräften (rote Vektorpfeile), die in horizontale Richtung zeigen dargestellt. Ebenso ersichtlich ist der Angriffspunkt der jeweiligen Kräfte am schwarzen Ersatzmodell. Da nun die Wirkungslinie der resultierenden Kraft F_{Res} (violette Kraft) die Kipplinie schneidet, kommt es zu keinem Kippmoment, welches eine Bewegung aus der Gleichgewichtslage bewirken würde.

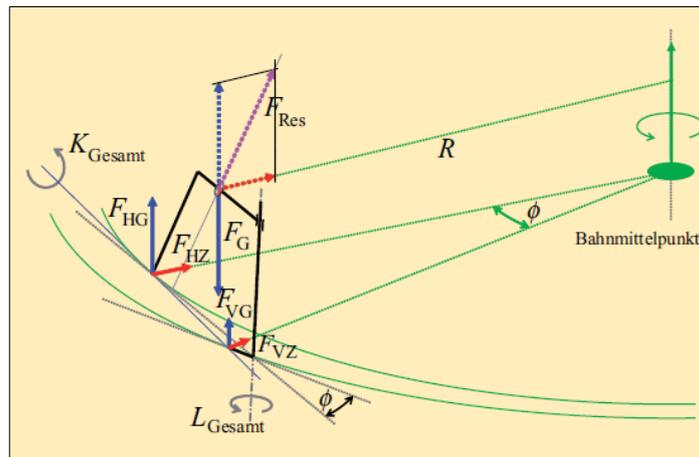


Abb. 2: Fahrradmodell aus Abb. 1 in einer stationären Kreisfahrt [5]

Kommt es jedoch zu einer Änderung von einem der beiden Winkel (Lenk- bzw. Kippwinkel) verschiebt sich die Kippachse gegenüber der Wirkungslinie und es kommt zu einer Verschiebung des Schwerpunktes um den Weg w , wie in **Abb. 3** ersichtlich, und in weiterer Folge zu einem Kippmoment.

„Da erfahrungsgemäß das Gleichgewicht halten auf einem stehenden Fahrrad kaum möglich ist [beziehungsweise nur von sehr geübten Fahrern durchführbar ist, Anm. S.S.-G.], muss die während der Fahrt leicht haltende Balance demnach von dynamischen Kräften herrühren, die erst durch die Bewegung des Fahrrades mit der Bahngeschwindigkeit v hinzukommen.“ [5]

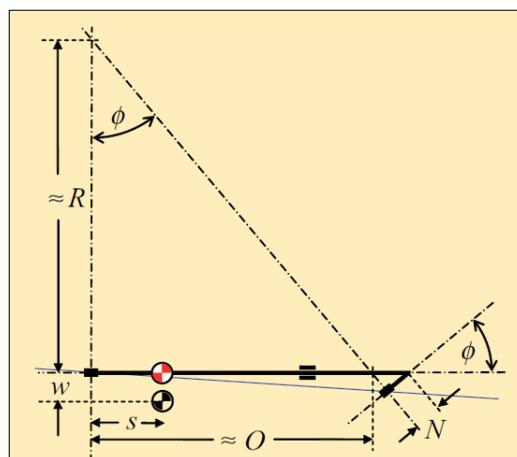


Abb. 3: Grundriss des Fahrradmodells aus Abb. 1 mit eingeschlagenem Lenker [5]

Um unterschiedliche Gleichgewichtslagen nun ermitteln zu können, wird eine Gesamtbilanz der auftretenden Drehmomente erstellt. Ist die Summe der Lenk- und Kippmomente gleich null, so ist eine Gleichgewichtslage gefunden, wie in den Gleichungen (1) und (2) ersichtlich.

$$K_{\text{Gesamt}} = C_1 \kappa + C_4 w + [C_3 + (C_6 + C_8)v^2] \phi = 0 \quad (1)$$

$$L_{\text{Gesamt}} = C_2 \kappa + [C_5 + (C_7 + C_9)v^2] \phi = 0 \quad (2)$$

Abb. 4 zeigt jene Kombinationen des Lenkwinkels ϕ und der Geschwindigkeit v die erforderlich sind, um eine Gleichgewichtslage zu erhalten. Für einen festen, also gewählten Kippwinkel $\kappa = -1$ Grad und einer angenommenen Verschiebung des Schwerpunktes w von -3 cm, lässt sich somit bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s ein Lenkwinkel ϕ von 2 Grad einstellen (siehe Schnittpunkt der schwarzen Linien in **Abb. 4**), um das Gesamtkippmoment von null zu erhalten und somit in Gleichgewichtslage zu verharren. Ebenso lassen sich für ein Gesamtlenkmoment von null die Geschwindigkeit v und der Lenkwinkel ϕ herauslesen. Im Fall des Schnittpunktes der grünen Linien sind das die Werte $v=2,7$ m/s und $\phi=3$ Grad.

Des Weiteren zeigt das Diagramm in **Abb. 4**, dass bei konstanter Geschwindigkeit und einer größeren Schwerpunktsverschiebung, also einem größeren Wert w , ein größerer Lenkwinkel ϕ erforderlich ist, um eine Gesamtbilanz von null zu erhalten [5].

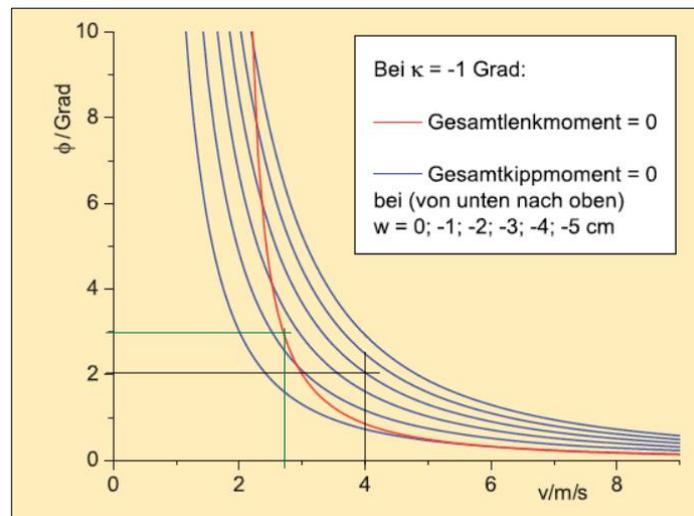


Abb. 4: Gleichgewichtsbedingung [5]

„Das Vorhandensein von Gleichgewichtslagen besagt noch nichts über deren Stabilität. Wird eine stationäre Radfahrt durch eine winzige Störung nur leicht aus dem Gleichgewicht gebracht, so gibt es verschiedenartige Reaktionsweisen, die aus Modellen der Dynamik des Fahrrades vorhergesagt werden können.“ [5]

Jeder Fahrradtyp besitzt in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich eine Eigenstabilität. Dieser liegt bei einem „Cityrad“ zwischen 16 km/h und 22 km/h. In diesem Bereich werden kleine Störungen der Fahrlage ohne Eingriff des Fahrers weggedämpft. Außerhalb, aber vor allem unterhalb dieses Bereiches, führen Störungen der Fahrlage zu Schlingerbewegungen. Die Lenkausschläge eines Radfahrers sind somit Antworten auf das Kippen von Fahrrädern [5].

„Dynamische Kräfte ermöglichen Gleichgewichtslagen des Fahrrades, bei denen es stationäre Kreisbahnen durchfährt. Befindet man sich als Radfahrer in solch einer Gleichgewichtslage, so genügen bereits geringfügige Änderungen des Lenkeinschlages oder sehr kleine Gewichtsverlagerungen, um ein leicht gestörtes Gleichgewicht wieder herzustellen [sic!]. Daher kann unser Balanciergleichgewicht dies in solchen Fahrlagen ganz beiläufig leisten. Welche Gleichgewichtslagen möglich sind, ergibt sich aus einer Bilanz wirksamer Kräfte und Drehmomente.“ [5]

All diese physikalischen Annahmen und mathematischen Darstellungen versuchen die Fahrdynamik theoretisch abzubilden. Alle Variablen der Gleichungen (1) und (2), die so gewählt werden, um eben letztere zu erfüllen, bilden ab, was Radfahrer intuitiv machen. In Kapitel 3 der Arbeit wird durch empirische Messungen von verschiedenen Fahrradtypen auf Gefällestrucken explizit darauf geachtet, wie sich die Verkehrsteilnehmer verhalten, ob Schlingerbewegungen bergauf oder bergab einen größeren Platzbedarf brauchen und ob die Geschwindigkeit einen Einfluss darauf hat.

2.2 Bestandteile eines baulich getrennten Einrichtungsweges nach RVS

In den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) 03.02.13 sind die Planungsgrundlagen für den Radverkehr geregelt. In Kapitel 8.1 „Trennprinzip“ sind die Mindest- und Regelbreiten für straßenbegleitende Radwege angegeben.

Die Regelbreite des Radweges beträgt 1,60 m–2,00 m. Jedoch ist eine Mindestbreite von 1,00 m (vgl. Wert in Klammer in **Abb. 5**) erlaubt.

Der Schutzstreifen trennt den Radweg von der Fahrbahn und dient als Schutz für den/die Radfahrer vor dem ruhenden oder fließenden Verkehr. Ausgebildet wird der Streifen mit einem Mindestmaß von 0,50 m und das häufig auf dem Niveau des Radweges, wodurch der Schutzstreifen notfalls befahren werden kann. Getrennt werden Radweg und Schutzstreifen auf gleichem Niveau durch eine Bodenmarkierung. Liegen allerdings Radweg und Fahrbahn auf einem Niveau, werden diese durch einen erhöhten Schutzstreifen getrennt (siehe **Abb. 5**) [4].

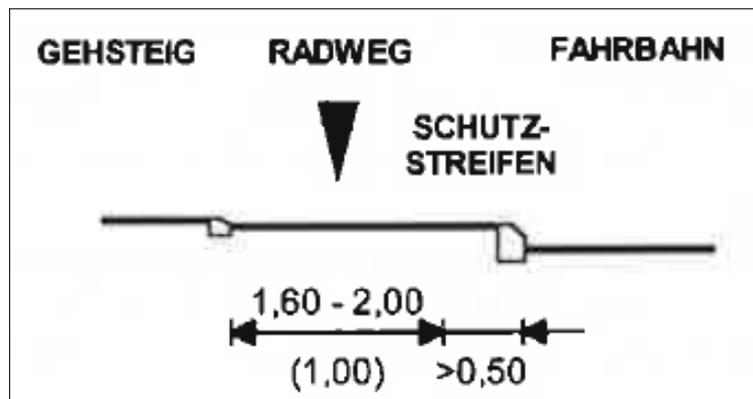


Abb. 5: Querschnitt für straßenbegleitenden Einrichtungsweg [4]

3 Versuchsaufbau und Messergebnisse

Um die in Kapitel 2.1 beschriebenen physikalischen Vorgänge während einer Radfahrt beobachten und in weiterer Folge bewerten zu können, ist auf insgesamt sieben verschiedenen Radwegen in Wien gefilmt worden. Jeder der betrachteten Radwege wies dabei unterschiedliche Steigungen beziehungsweise Gefälle auf (siehe dazu **Tab. 1**), um dadurch eventuell den Einfluss der Geschwindigkeit je nach Fahrtrichtung zu erkennen. Die Neigungen wurden online im Stadtplan vom Geodatenviewer der Stadtvermessung Wien mithilfe des Messwerkzeuges ermittelt [9]. Jene Straßen, die in der Spalte „Richtung [bergab, bergauf]“ mit „beide“ bezeichnet sind, sind Zweirichtungswegradwege. Bei den anderen handelt es sich um Einrichtungswegradwege.

Tab. 1: Messstationen nach Straßennamen inkl. Gefälleangabe und Fahrtrichtung

Straßenname	Gefälle/Steigung	Richtung [bergab, bergauf]
Argentinierstraße (1040 Wien)	4,3 %	beide
Wiedner Hauptstraße (1040 Wien)	2,9 %	bergab
Wiedner Hauptstraße (1040 Wien)	3,6 %	bergauf
Maria – Theresien Straße (1090 Wien)	2,5 %	bergauf
Berggasse (1090 Wien)	9,3 %	bergauf
Kundmanngasse (1030 Wien)	2,7 %	beide
Wassergasse (1030 Wien)	2,3 %	beide

Gefilmt wurde mit einer handelsüblichen GoPro Hero5 [7]. Dabei wurde auf jedem Radweg ein Zeitfenster von ungefähr 2,5 Stunden eingeplant, um eine repräsentative Anzahl an Verkehrsteilnehmer zu erhalten. In **Tab. 2** und **Tab. 3** sind diese je Fahrtrichtung ersichtlich. Insgesamt wurden 1.174 Verkehrsteilnehmer in 17,5 Stunden Messdauer erfasst. Das ergibt 1,12 Verkehrsteilnehmer pro Minute.

Tab. 2: Verkehrsteilnehmer je Messstation bergauf

Messstation	Messdauer [h]	Anzahl Verkehrsteilnehmer
Argentinierstraße	2,75	177
Wiedner Hauptstraße	2,5	48
Maria – Theresien Straße	2,5	201
Berggasse	2,5	81
Kundmanngasse	2,5	62
Wassergasse	2,25	58
	Σ 15	Σ 627

Tab. 3: Verkehrsteilnehmer je Messstation bergab

Messstation	Messdauer [h]	Anzahl Verkehrsteilnehmer
Argentinierstraße	2,75	301
Wiedner Hauptstraße	2,5	109
Kundmanngasse	2,5	54
Wassergasse	2,25	83
	Σ 10	Σ 547

Primär wurden die Aufzeichnung genutzt, um eine Geschwindigkeitsverteilung für jeden der einzelnen Radwege zu ermitteln. In weiterer Folge wurde mit Hilfe des Videoschnittprogrammes DaVinci Resolve der Firma Blackmagic Design¹ und des Grafik- und Zeichenprogrammes Adobe Illustrator² der Firma Adobe Inc. die Videos so bearbeitet, dass das Fahrverhalten bzw. die Fahrodynamik (physikalisch in Kapitel 2.1 beschrieben) der Verkehrsteilnehmer mithilfe einer eingebetteten Rasterfläche analysiert werden konnte. Ermittelt wurde die Anzahl der Rasterflächen, die vom Vorderrad durchfahren wurden. Dabei wurden Zweirichtungsradwege in acht Teile unterteilt und Einrichtungsradwege in vier Teile unterteilt. Die Rasterkästchen weisen alle dieselbe Breite auf (siehe **Tab. 4**). Die Anzahl der Unterteilung wurde so gewählt, um einen relativen Wert des jeweiligen Breitenbedarfs angeben zu können. Wurden beispielsweise 3 von 4 Rasterflächen eines Teilnehmers durchfahren, bedeutet das einen Breitenbedarf von 75% für diese eine Fahrt. Eine repräsentative Darstellung aller Radwege ist in **Abb. 6** ersichtlich. Die weiteren Kameraperspektiven sind im Anhang zu finden.

¹ <https://www.blackmagicdesign.com/at/products/davinciresolve/>

² <https://adobe.ly/2VFmWr3>



Abb. 6: Kameraperspektive in der Argentinierstraße (Zweirichtungsradweg) inkl. Rasterfläche

Tab. 4: Radwegbreiten aller Messstationen

Radweg	Gesamtbreite [m]	Breite Rasterkästchen [m]
Argentinierstraße	2,00	0,25
Wiedner Hauptstraße bergauf	1,00	0,25
Wiedner Hauptstraße bergab	1,00	0,25
Maria – Theresien Straße	1,00	0,25
Berggasse	1,00	0,25
Kundmanngasse	2,00	0,25
Wassergasse	2,00	0,25

3.1 Messstationen und Messergebnisse

Argentinierstraße

Als erste Messstelle wurde die Argentinierstraße im 4. Bezirk in Wien gewählt. Mit einem Gefälle von 4,3 % (siehe Tab. 1) liegt das Gefälle leicht über dem Durchschnitt (3,9 %) der betrachteten Messstellen. In Abb. 7 sind die Kameraposition und der analysierte Abschnitt in der Argentinierstraße ersichtlich. Die eingebettete Rasterfläche, die den Zweirichtungsradweg in acht Teile unterteilt, ist in Abb. 6 zu erkennen.



Abb. 7: Kameraposition und analysierter Abschnitt in der Argentinierstraße [10]

Der Radweg der Argentinierstraße, zurzeit noch als baulich getrennter Zweirichtungsradweg ausgeführt, soll in Zukunft in eine Fahrradstraße umgebaut werden, da das Verkehrsaufkommen in den letzten Jahren enorm zugenommen hat. Allein der Zuwachs im Jahr 2018 zum Vorjahr, also zum Jahr 2017, betrug 10,3 % [8].

Die hohe Verkehrsfrequenz war auch während der Messung zu erkennen und spiegelt sich in den Zahlen der Verkehrsteilnehmer wider. Insgesamt 478 Radfahrer wurden in 2,75 Stunden erfasst. Das entspricht einem Anteil von 40,7 % der Gesamtteilnehmer und einer Verkehrsfrequenz von 2,9 Teilnehmer pro Minute. Von diesen 478 Radfahrer fuhren insgesamt 177 bergauf und 301 bergab. In **Abb. 9** und **Abb. 8** sind diese je Fahrtrichtung und je Typ zu sehen.

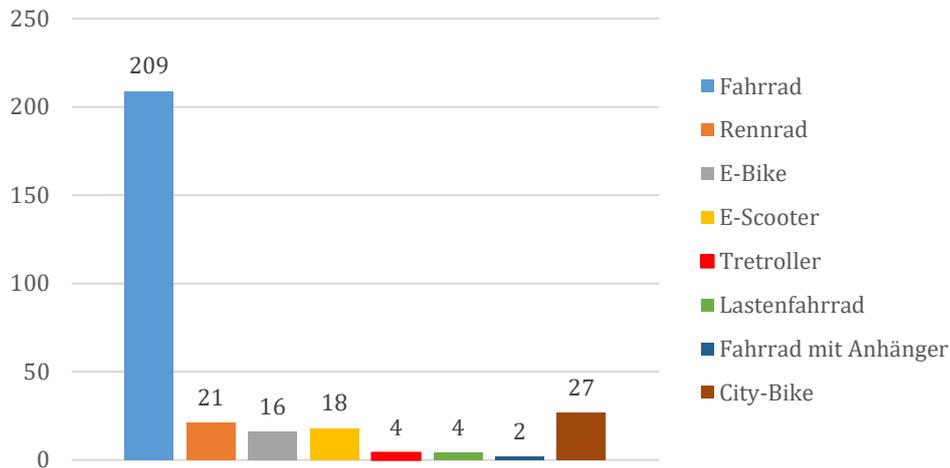


Abb. 8: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Argentinierstraße bergab

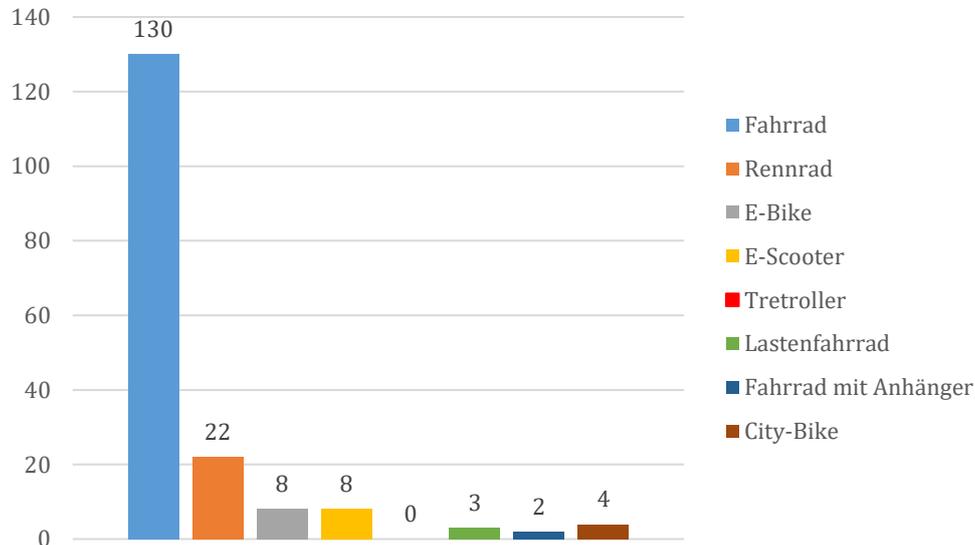


Abb. 9: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Argentinierstraße bergauf

Wie bereits erwähnt wurden im analysierten Abschnitt die Geschwindigkeiten der einzelnen Verkehrsteilnehmer ermittelt. Dazu wurde ein Bereich („Analysierter Abschnitt“ in **Abb. 7**) betrachtet und mittels Stoppuhr die Dauer der Durchfahrt des Bereiches eines/r Verkehrsteilnehmers gemessen. Anschließend wurde für die jeweilige Fahrtrichtung eine Geschwindigkeitsverteilung erstellt, in der alle Fahrradtypen miteingerechnet wurden. Die Geschwindigkeitsverteilung gilt also für den Radweg in die jeweilige Richtung unabhängig vom Typ. In **Abb. 10** sind die Verteilungen der jeweiligen Richtung dargestellt.

Die durchschnittliche Geschwindigkeit der bergab fahrenden Teilnehmer in der Argentinierstraße beträgt 26,33 km/h und die Standardabweichung 5,65 km/h (vgl. **Abb. 10**, orange Kurve). Im Gegensatz dazu beträgt der Geschwindigkeitsdurchschnitt der bergauf fahrenden Teilnehmer 12,78 km/h und die Standardabweichung 3,72 km/h (vgl. **Abb. 10**, blaue Kurve).

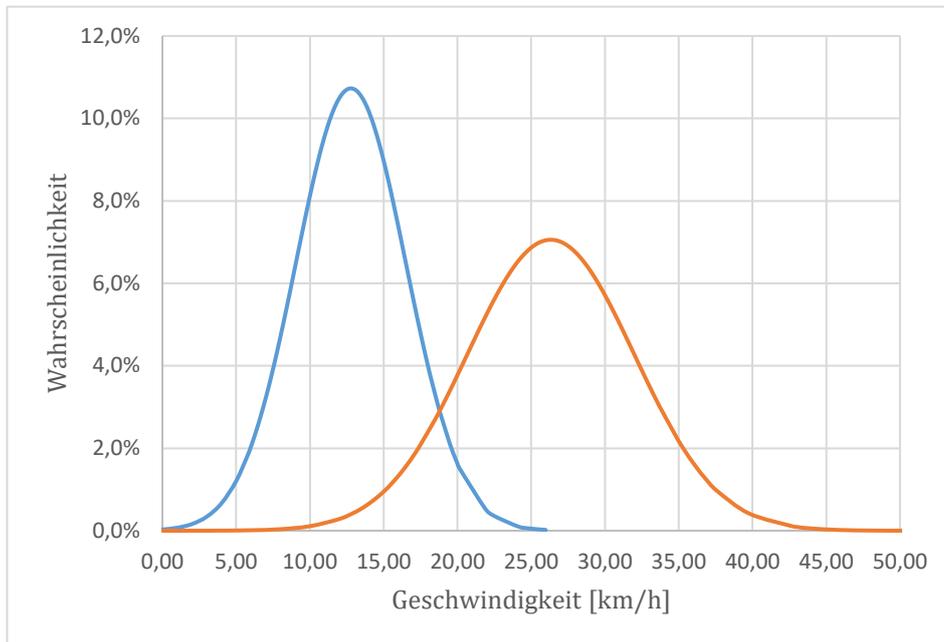


Abb. 10: Geschwindigkeitsverteilungen Argentinierstraße bergauf [blau] und bergab [orange]

Eine Rasterfläche wurde gewählt, um abschätzen zu können, wieviel Platz auf die Breite des Radweges bezogen, ein Radfahrer im analysierten Abschnitt benötigt. Im Fall eines Zweirichtungsradweges wurde dabei, wie am Anfang des Kapitels schon erwähnt, der Radweg in acht gleiche Teile unterteilt (siehe **Abb. 7**), von denen jeweils vier für eine Richtung zur Verfügung standen. Kam es durch starke Schlingerbewegungen dazu, dass die gesamte Breite des Radweges benutzt wurde, war es durchaus möglich, dass sogar bis zu sieben oder acht Teile der Rasterfläche befahren wurden. War dies der Fall, bekam der Teilnehmer die Zahl sieben bzw. acht als Breitenbedarf zugesprochen. Das wurde bei jedem einzelnen Verkehrsteilnehmer durchgeführt und danach ein Mittelwert erstellt. Anschließend wurde der Anteil des durchschnittlichen Breitenbedarfs in Prozent aller Teilnehmer ausgewertet, um darstellen zu können wieviel Platz benötigt wurde. Die Angabe des Breitenbedarfs erfolgt in Prozent, da die Radwege unterschiedliche Breiten aufweisen. Die Ergebnisse der Argentinierstraße je Fahrtrichtung sind in den **Tab. 5** und **Tab. 6** zu finden.

Tab. 5: Ergebnis Breitenbedarf Argentinierstraße bergab

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
301	1,21	4	30,14

Tab. 6: Ergebnis Breitenbedarf Argentinierstraße bergauf

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
177	2,49	4	62,22

Kundmanngasse

Wie in der Argentinierstraße ist auch die Kundmanngasse im 3. Bezirk als Zweirichtungsradweg ausgeführt. Das Gefälle beträgt 2,7 % (siehe **Tab. 1**) und liegt somit unter dem Durchschnitt

(3,9 %) aller Neigungen der betrachteten Radwege. Welcher Abschnitt der Kundmanngasse betrachtet wurde und von welcher Position gefilmt wurde, ist in **Abb. 11** zu sehen.

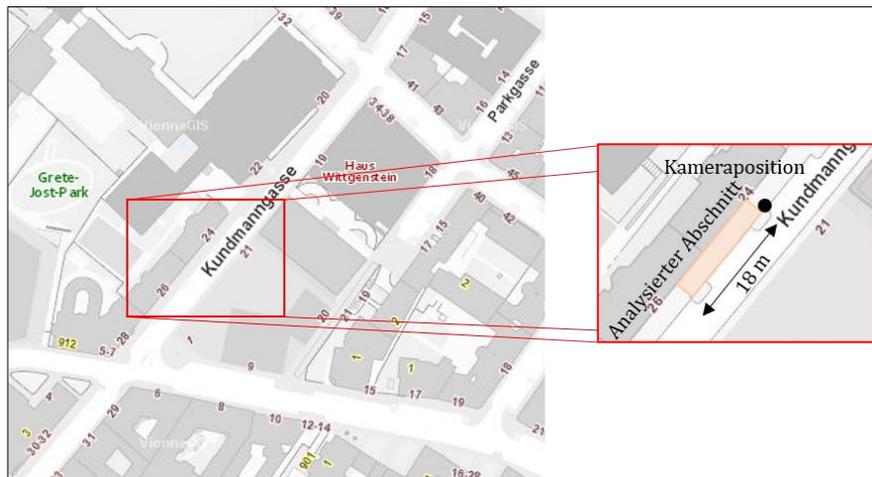


Abb. 11: Kameraposition und analysierter Abschnitt in der Kundmanngasse [10]

In einer Zeit von 2,5 Stunden wurden insgesamt 116 Radfahrer erfasst. Das entspricht einem Anteil von 9,9 % der Gesamtteilnehmer und einer Verkehrsfrequenz von 0,8 Teilnehmer pro Minute. Von diesen 116 Radfahrer fuhren insgesamt 54 bergab und 62 bergauf. In **Abb. 12** und **Abb. 13** sind diese je Fahrtrichtung und je Typ in einem Diagramm dargestellt.

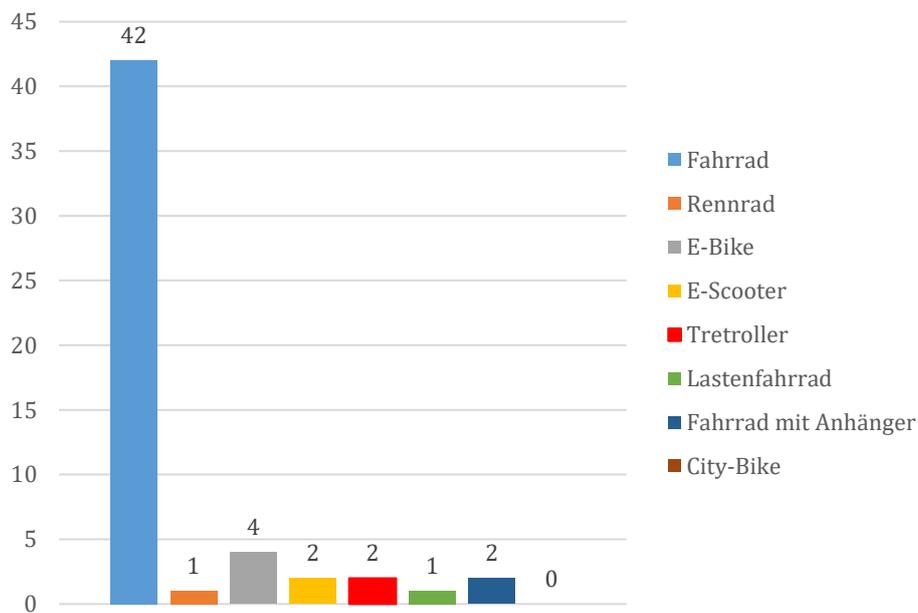


Abb. 12: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Kundmanngasse bergab

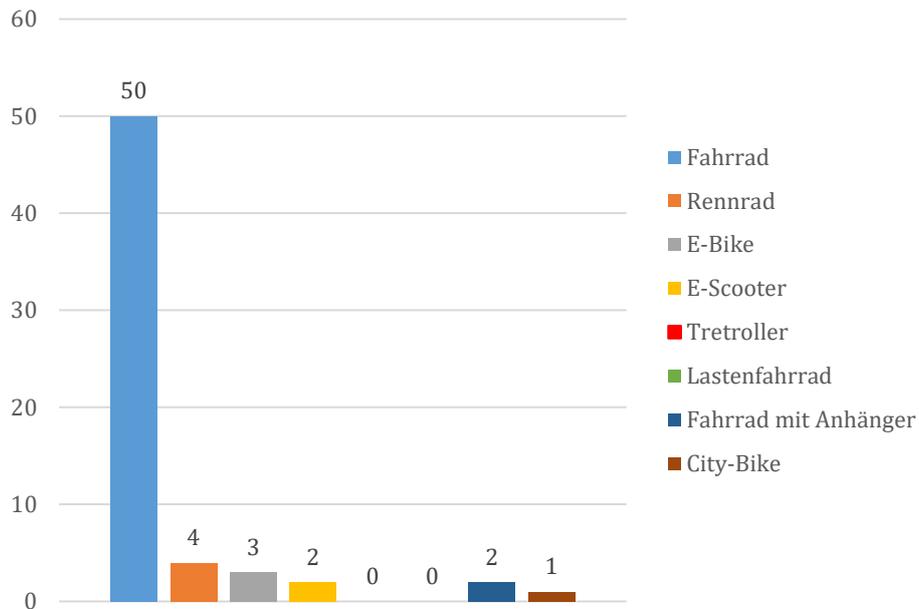


Abb. 13: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Kundmanngasse bergauf

Die Geschwindigkeitsverteilungen der Kundmanngasse (vgl. **Abb. 14**) wurden, wie im Unterkapitel „Argentinierstraße“ beschrieben, ermittelt. Der Durchschnitt der bergab fahrenden Verkehrsteilnehmer betrug 18,53 km/h und die Standardabweichung 4,06. km/h. Für die Verkehrsteilnehmer, die bergauf fuhren, kam ein Mittelwert von 15,90 km/h und eine Standardabweichung von 3,17 km/h zu Stande.

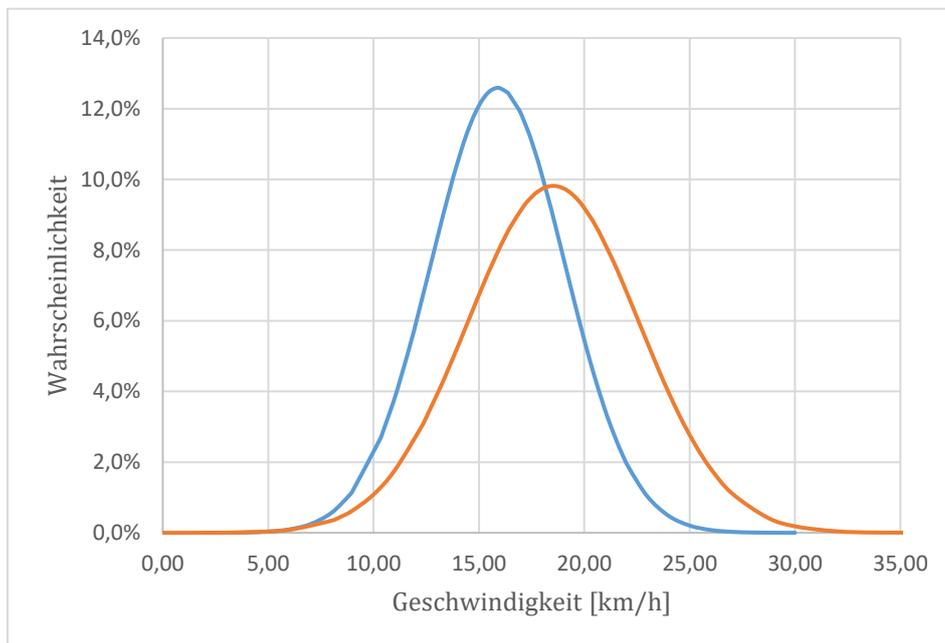


Abb. 14: Geschwindigkeitsverteilung Kundmanngasse bergauf [blau] und bergab [orange]

Wie auch in der Argentinierstraße wurde die Kundmanngasse durch ein acht teiliges Rasterfeld analysiert (vgl. **Abb. 34**). Wiederum wurden je Fahrtrichtung vier Teile, also die Hälfte der Rasterfläche, herangezogen. Dabei kam es bergab sowie bergauf zu den Werten, die in **Tab. 7** und **Tab. 8** nachzusehen sind.

Tab. 7: Ergebnis Breitenbedarf Kundmanngasse bergab

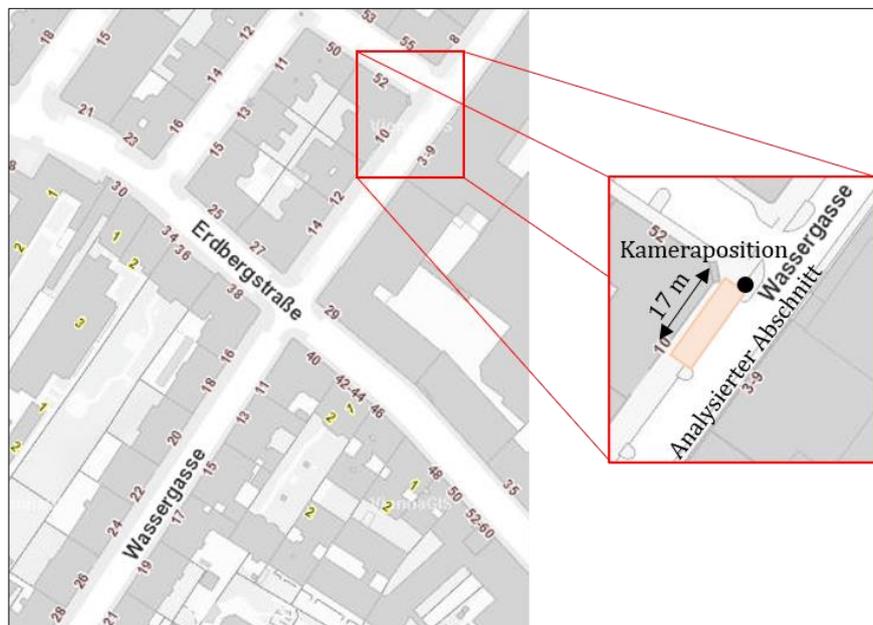
Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
54	1,41	4	35,19

Tab. 8: Ergebnis Breitenbedarf Kundmanngasse bergauf

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
62	2,23	4	55,65

Wassergasse

Wie bei der Argentinierstraße und bei der Kundmanngasse handelt es sich auch bei der Wassergasse um einen Zweirichtungsradweg. Da die Wassergasse nur ein paar Straßen weiter liegt, unterscheidet sich das Gefälle kaum. Mit 2,3 % liegt dieses auch unter dem Durchschnitt (3,9 %) aller Radwege, auf denen gefilmt und gemessen wurde. Gleichzeitig ist das Gefälle auch das geringster aller Radwege. Standort der Kamera und analysierter Abschnitt sind in **Abb. 15** zu sehen.

**Abb. 15:** Kameraposition und analysierter Abschnitt in der Wassergasse [10]

In einer Zeit von 2,5 Stunden wurden insgesamt 141 Radfahrer erfasst. Das entspricht einem Anteil von 12,0 % der Gesamtteilnehmer und einer Verkehrsfrequenz von 0,94 Teilnehmer pro Minute. Von diesen 116 Radfahrer fuhren insgesamt 83 bergab und 58 bergauf. In **Abb. 16** und **Abb. 17** sind diese je Fahrtrichtung und je Typ in einem Diagramm dargestellt.

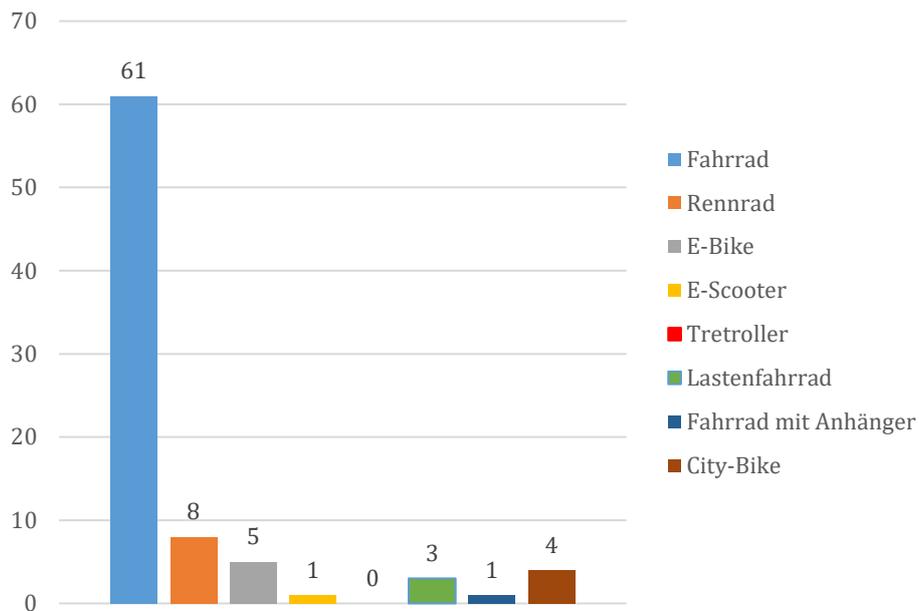


Abb. 16: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Wassergasse bergab

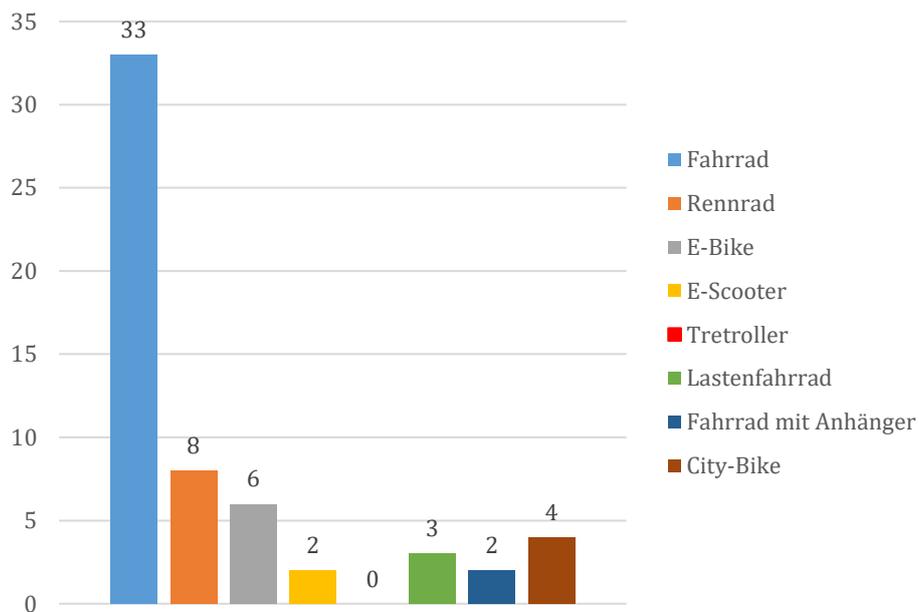


Abb. 17: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Wassergasse bergauf

Die Geschwindigkeitsverteilungen der Wassergasse (vgl. **Abb. 18**) wurden, wie im Unterkapitel „Argentinerstraße“ beschrieben, ermittelt. Der Durchschnitt der bergab fahrenden Verkehrsteilnehmer betrug 22,87 km/h und die Standardabweichung 4,66. km/h. Für die Verkehrsteilnehmer, die bergauf fuhren, kam ein Mittelwert von 16,96 km/h und eine Standardabweichung von 4,33 km/h zu Stande.

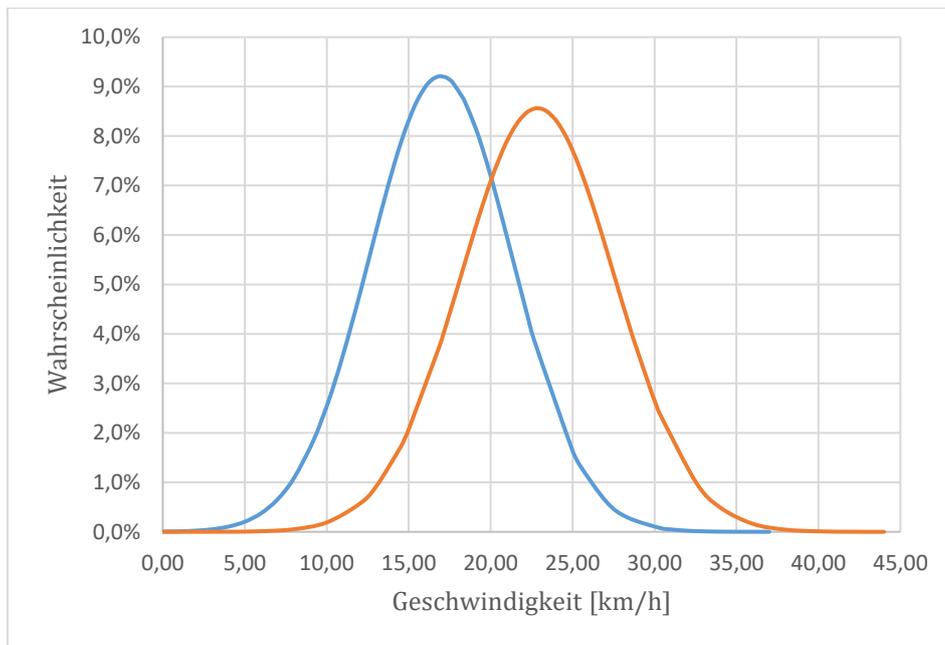


Abb. 18: Geschwindigkeitsverteilung Kundmannngasse bergauf [blau] bergab [orange]

Wie auch die anderen Zweirichtungsradwege wurde die Wassergasse durch ein achteiliges Rasterfeld analysiert (vgl. **Abb. 35**). Wiederum wurden je Fahrtrichtung vier Teile, also die Hälfte der Rasterfläche, herangezogen. Dabei kam es bergab sowie bergauf zu den Werten, die in **Tab. 9** und **Tab. 10** nachzusehen sind.

Tab. 9: Ergebnis Breitenbedarf Wassergasse bergab

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
83	1,34	4	33,54

Tab. 10: Ergebnis Breitenbedarf Wassergasse bergab

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
58	2,13	4	53,1

Wiedner Hauptstraße

Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Radwegen handelt es sich hierbei um einen Einrichtungsradweg. In der Wiedner Hauptstraße gibt es Einrichtungsradwege auf beiden Seiten der Straße. Einer führt bergab, der andere bergauf. Im Folgenden sind die Kamerapositionen und die analysierten Abschnitte beider Radwege angeführt (vgl. **Abb. 38** und **Abb. 39**). Jener Radweg, der bergab geführt ist, ist mit einem Gefälle von 2,9 % ausgeführt. Der bergauf geführte Radweg hat hingegen ein Gefälle von 3,6 %. Beide liegen unter dem Durchschnitt von 3,9 %. Auch, wenn es beim bergauf geführten eher knapp ist.

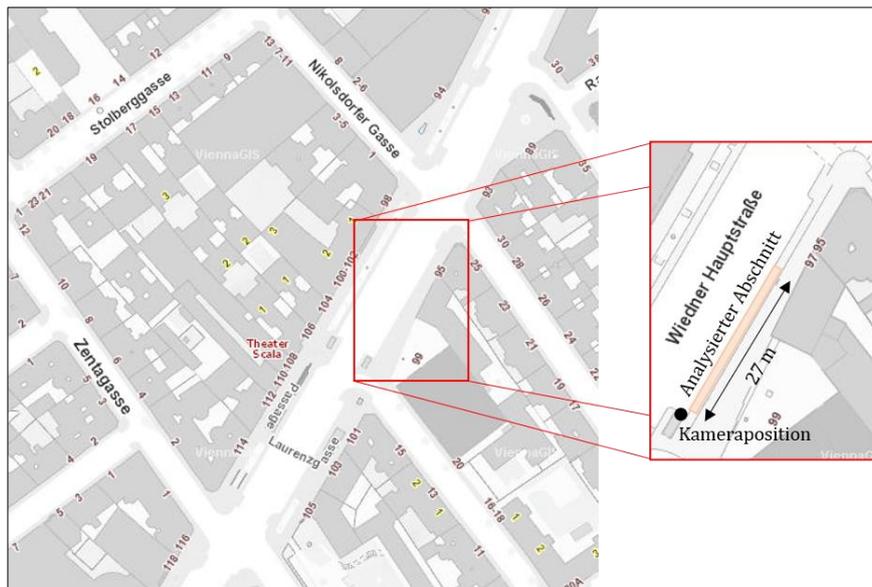


Abb. 19: Kameraposition und analysierter Abschnitt in der Wiedner Hauptstraße bergab [1010]

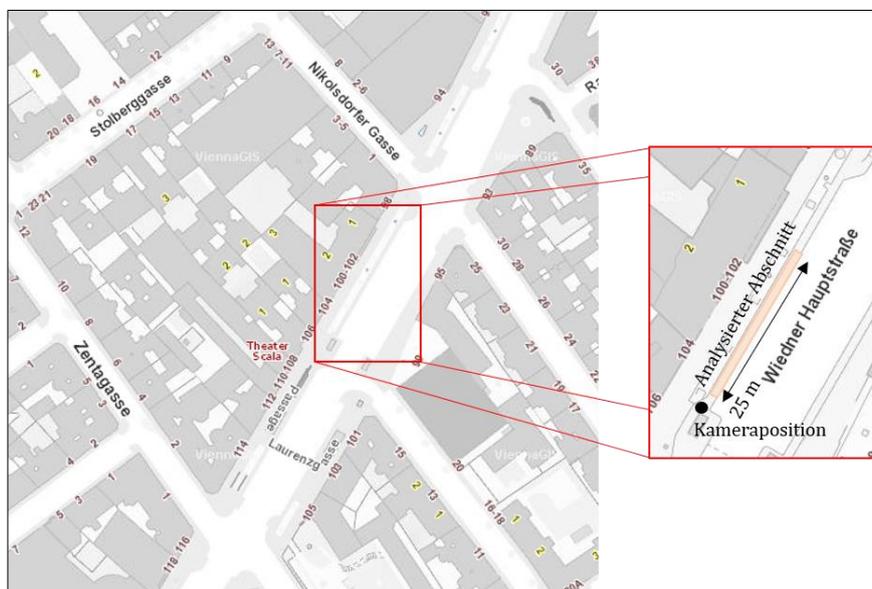


Abb. 20: Kameraposition und analysierter Abschnitt in der Wiedner Hauptstraße bergauf [10]

In jeweils 2,5 Stunden wurden insgesamt 157 Verkehrsteilnehmer erfasst. Das entspricht einem Anteil von 13,4 % der Gesamtteilnehmer und einer Verkehrsfrequenz von 0,52 Teilnehmer pro Minute. Bergab wurden 109 Teilnehmer erfasst. Bergauf waren es 48 Teilnehmer. In **Abb. 21** und **Abb. 22** sind die Verkehrsteilnehmer je Radweg und Fahrtyp angeführt.

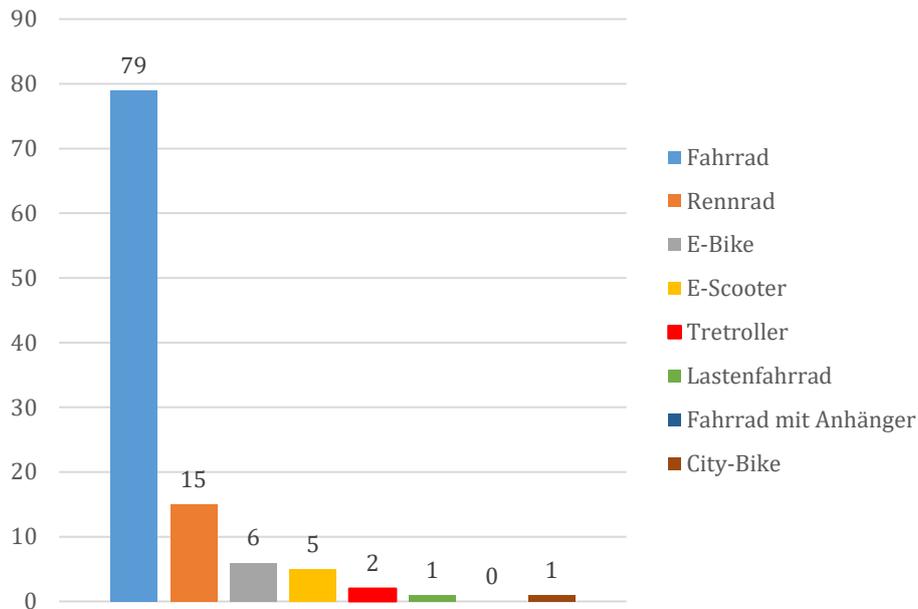


Abb. 21: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Wiedner Hauptstraße bergab

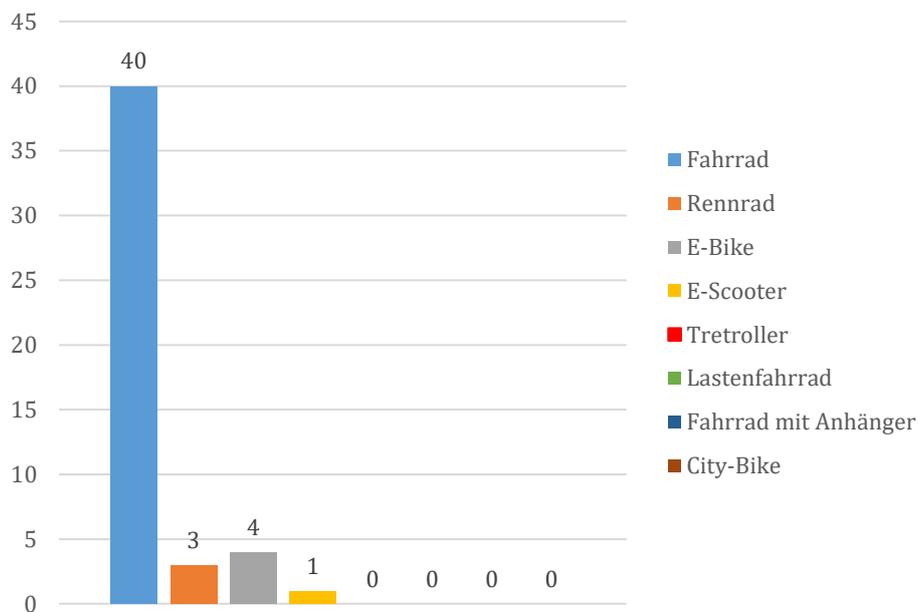


Abb. 22: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Wiedner Hauptstraße bergauf

Die Geschwindigkeitsverteilungen sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Der Durchschnitt der Geschwindigkeit auf dem bergab geführten Radweg betrug 26,44 km/h. Mit einer Standardabweichung von 5,38 km/h fiel diese gegenüber den anderen eher großzügiger aus. Der Mittelwert beträgt bergauf 15,45 km/h. Die Standardabweichung beträgt 4,28 km/h.

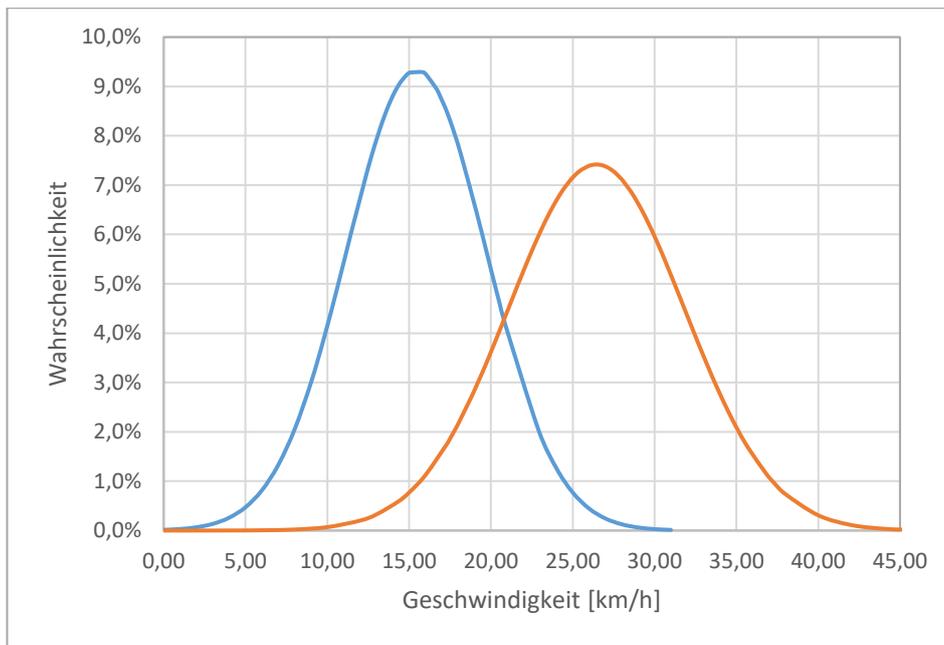


Abb. 23: Geschwindigkeitsverteilung Wiedner Hauptstraße bergauf [blau] bergab [orange]

Da es sich nun um Einrichtungradwege handelt, wurden beide jeweils mit einem vierteiligen Raster versehen (vgl. **Abb. 38** und **Abb. 39**). Das entspricht der Hälfte eines Zweirichtungsrads. Somit kann die Relation des Breitenbedarfs vernünftig angegeben werden.

Tab. 11: Ergebnis Breitenbedarf Wiedner Hauptstraße bergab

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
109	1,39	4	34,72

Tab. 12: Ergebnis Breitenbedarf Wiedner Hauptstraße bergauf

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
48	1,98	4	49,46

Maria-Theresien-Straße

Ein weiterer Einrichtungradweg ist die Maria-Theresien-Straße als Grenze zwischen dem 1. und 9. Bezirk, die bergauf geführt ist. Mit einem Gefälle von 2,5 % fällt dieses eher gering aus und liegt unterhalb des Durchschnitts von 3,9 %. Die Kameraposition und jene Fläche, die analysiert wurde, sind in **Abb. 24** ersichtlich. Die Aufteilung der Rasterfläche kann in **Abb. 37** nachgesehen werden. Wiederum wurde für einen Einrichtungradweg eine vierteilige Rasterfläche gewählt.

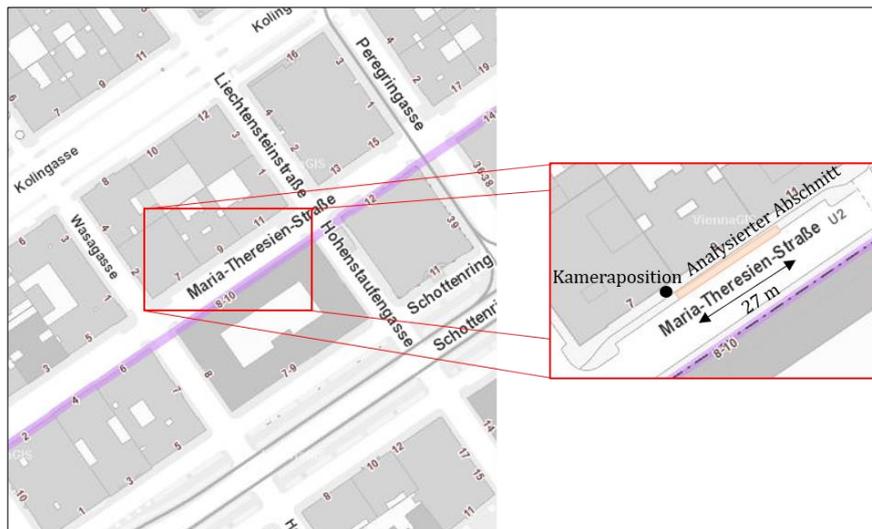


Abb. 24: Kameraposition und analysierter Abschnitt in der Maria-Theresien-Straße [10]

Erfasst wurden in 2,5 Stunden insgesamt 201 Verkehrsteilnehmer, die in **Abb. 25** je Fahrradtyp ersichtlich sind. 201 Verkehrsteilnehmer entspricht einem Anteil von 17,1 % der Gesamtteilnehmer und einer Verkehrsfrequenz von 1,34 Teilnehmer pro Minute.

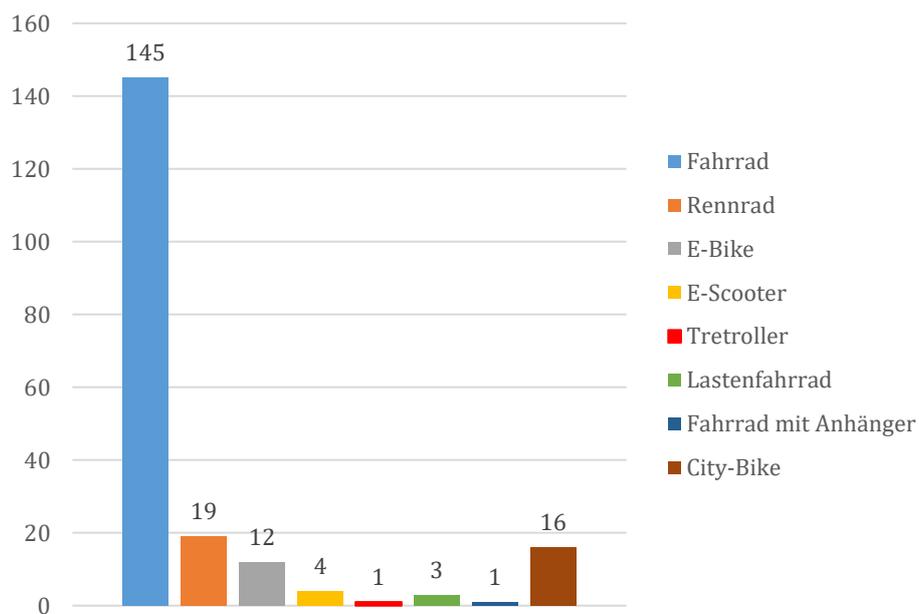


Abb. 25: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Maria-Theresien-Straße (bergauf)

Die Geschwindigkeitsverteilung der Maria-Theresien-Straße ist in **Abb. 26** angeführt. Der Mittelwert beträgt 14,98 km/h und die Standardabweichung 3,32 km/h.

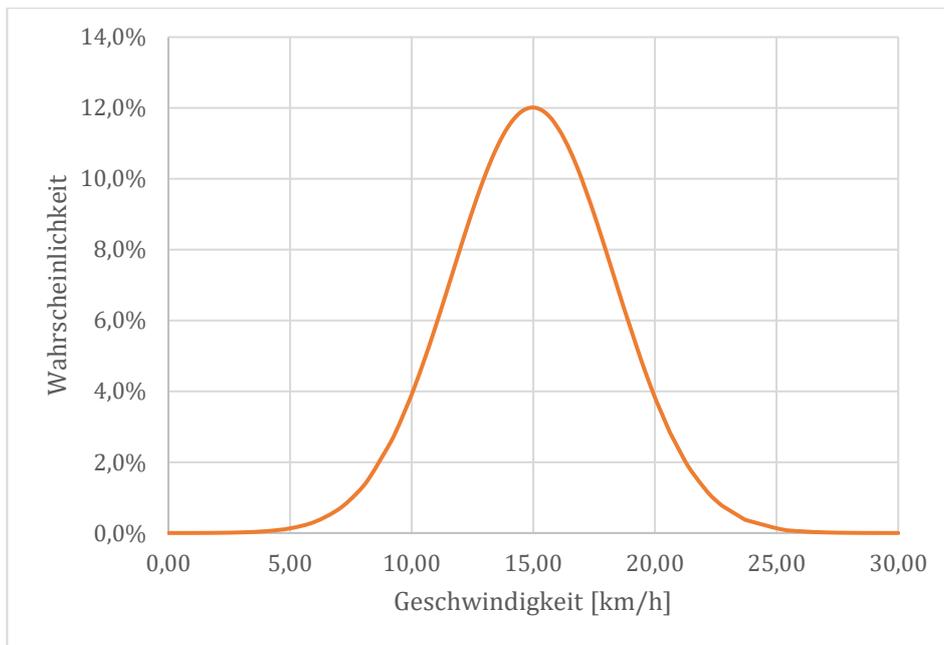


Abb. 26: Geschwindigkeitsverteilung Maria-Theresien-Straße

Das Ergebnis des Breitenbedarfs ist in **Tab. 13** angeführt.

Tab. 13: Ergebnis Breitenbedarf Maria-Theresien-Straße

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
201	1,98	4	49,38

Berggasse

Der Einrichtungsradweg in der Berggasse (9. Bezirk) bot mit 9,3 % die größte Neigung auf und liegt somit auch deutlich über dem Durchschnitt (3,9 %). Die Position der Kamera und der analysierte Abschnitt sind in **Abb. 27** zu finden. Die Rasterflächenaufteilung ist im Anhang in **Abb. 36** ersichtlich.

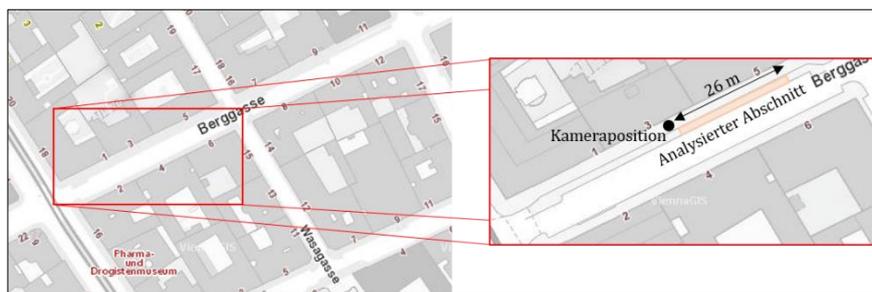


Abb. 27: Kameraposition und analysierter Abschnitt in der Berggasse [10]

Insgesamt wurden 81 Verkehrsteilnehmer in 2,5 Stunden erfasst. Das entspricht einem Anteil von 6,9 % der Gesamtteilnehmer und einer Verkehrsfrequenz von 0,54 Teilnehmer pro Minute. In **Abb. 28** sind die Teilnehmer je Fahrradtyp angeführt.

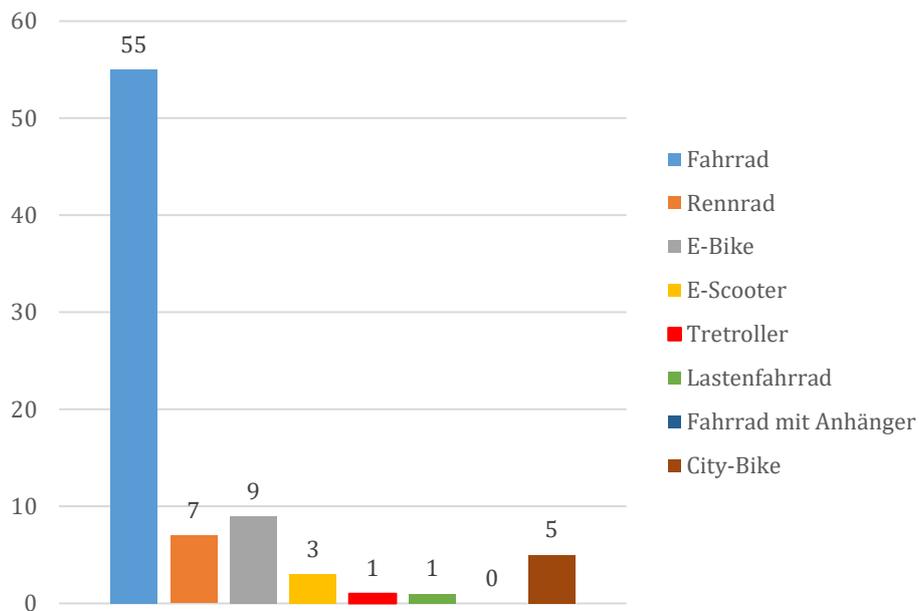


Abb. 28: Anzahl der Verkehrsteilnehmer je Fahrradtyp in der Berggasse (bergauf)

Die Geschwindigkeitsverteilung der Berggasse ist in **Abb. 29** angeführt. Der Mittelwert beträgt 11,65 km/h und die Standardabweichung 5,09 km/h.

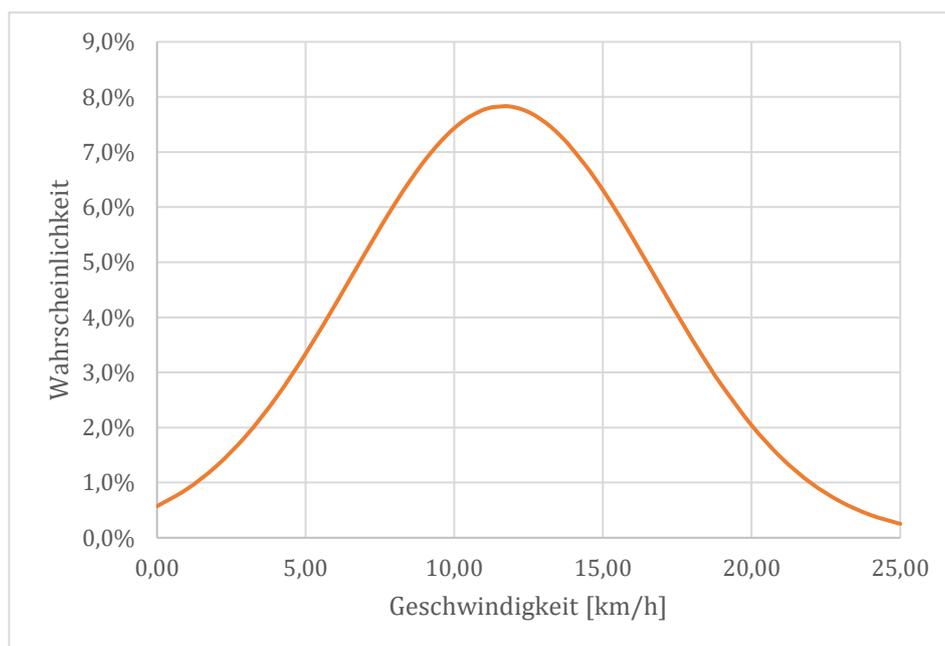


Abb. 29: Geschwindigkeitsverteilung Berggasse

Das Ergebnis des Breitenbedarfs ist in **Tab. 14** angeführt.

Tab. 14: Ergebnis Breitenbedarf Berggasse

Anzahl Teilnehmer	Mittelwert μ [Teile]	Gesamtbreite [Teile]	Anteil [%]
81	2,68	4	66,91

4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In Kapitel 2.1 wurde unter anderem beschrieben, dass die Fahrdynamik durch die gewählte Geschwindigkeit beeinflusst wird. Da es nun einen Unterschied macht, ob sich Teilnehmer einen Berg mit geringerer Geschwindigkeit und teilweise großer Anstrengung hinaufquälen oder gemütlich diesen mit größerer Geschwindigkeit bergab fahren, werden die Geschwindigkeitsverteilungen der einzelnen Radwege miteinander verglichen. Bei den in **Abb. 30** dargestellten Geschwindigkeitsverteilungen lässt sich kein Muster erkennen, ob durch größere Neigung auch die durchschnittliche Geschwindigkeit größer wird. Das würde bedeuten, dass für die Wahl der Geschwindigkeit auch andere Faktoren wie Übersicht auf dem Radweg, Gegenverkehr wie etwa auf einem Zweirichtungsradweg oder kein Gegenverkehr wie auf einem Einrichtungsradweg, mit einzubeziehen sind. Im Fall der untersuchten Radwege kann die große Geschwindigkeit auf der Argentinierstraße auf die Neigung zurückgeführt werden. Die größere Geschwindigkeit auf der Wiedner Hauptstraße ist zu erklären, da durch den Einrichtungsradweg kein Gegenverkehr zu erwarten ist. Die deutlich geringere Geschwindigkeit in der Kundmannngasse zu den anderen Zweirichtungsradwegen ist auf die sehr unübersichtliche Trennung zwischen Radweg und Gehweg zurückzuführen. Was allerdings alle bergab geführten Radwege gemeinsam haben, ist der geringe Kraftaufwand beim Treten der Pedale und der damit verbundenen geringen Lenkauslässe. Das wird ersichtlich, wenn die in **Tab. 15** angeführten Mittelwerte μ miteinander verglichen werden. So werden auf den betrachteten Radwegen durchschnittlich 30,14 % - 35,19 % der Breite des Radweges gebraucht bzw. für eine Fahrt verwendet. Das bedeutet, es kommt zu sehr geringen Ausschlägen der Fahrlinien.

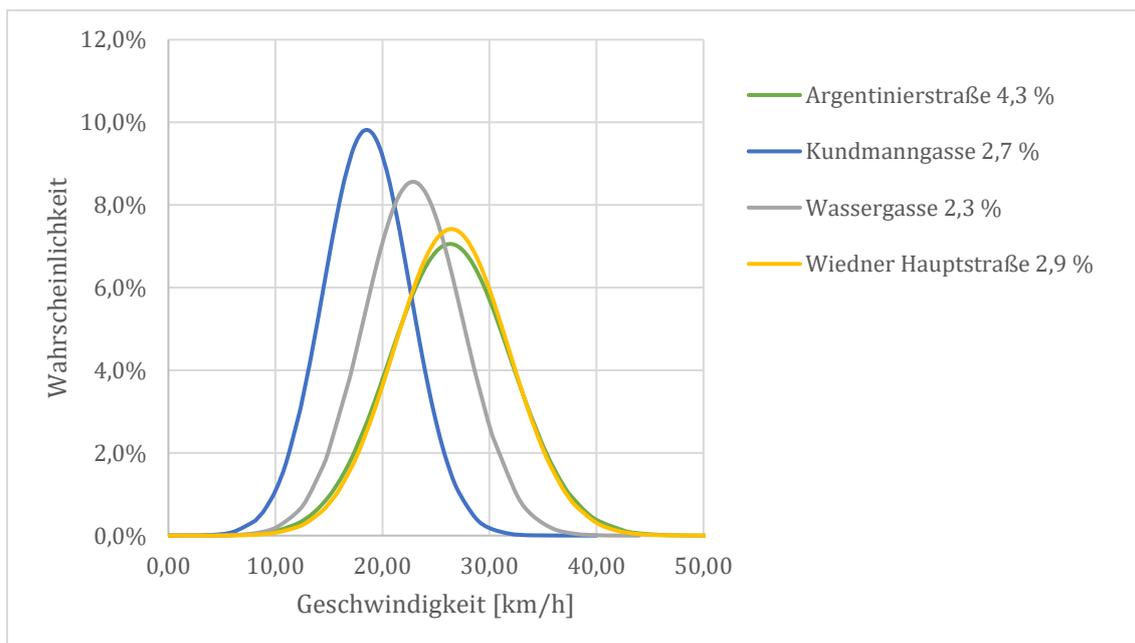


Abb. 30: Geschwindigkeitsverteilungen im Vergleich bergab

Tab. 15: Ergebnisse Breitenbedarf im Vergleich bergab

Straßenname	Anzahl	Gefälle [%]	Mittelwert μ [Teile]	Anteil [%]
Argentinierstraße	301	4,3	1,21	30,14
Kundmannngasse	54	2,7	1,41	35,19
Wassergasse	83	2,3	1,34	33,54
Wiedner Hauptstraße	109	2,9	1,39	34,72

Im Gegensatz zu den bergab geführten Radwegen fällt bei den bergauf geführten Radwegen auf, dass die durchschnittlichen Geschwindigkeiten geringer ausfallen (siehe **Abb. 31**). Ganz deutlich erkennbar ist dabei die geringste mittlere Geschwindigkeit in der Berggasse, die ganz klar auf die deutlich größere Steigung zurückzuführen ist. Die große Steigung von 9,3 % und damit verbundene Anstrengung war auch während der Messungen ersichtlich. Allein in 2,5 Stunden stiegen am Beginn der Steigung 13 Verkehrsteilnehmer (16 % der gesamten Teilnehmer) ab und schoben das Fahrrad den „Berg“ hinauf. Eine ebenso geringere Durchschnittsgeschwindigkeit herrscht in der Argentinierstraße, die ebenfalls noch eine größere Neigung aufweist als die anderen Radwege. Bei den Radwegen Kundmanngasse, Wassergasse, Wiedner Hauptstraße und Maria-Theresien-Straße ist ein sehr geringer Unterschied der durchschnittlichen Geschwindigkeiten zueinander zu erkennen.

Deutlich erkennbar ist in **Tab. 16** der größere Mittelwert μ des Breitenbedarfs jedes einzelnen Radweges zu den Werten der bergabgeführten Radwege (**Tab. 15**). Dabei ist zu erkennen, dass bei deutlichen Neigungsänderungen der Breitenbedarf stark zu- bzw. abnimmt. Der größte Unterschied liegt dabei zwischen der Wiedner Hauptstraße (49,46 %) und der Berggasse (66,91 %). Werden diese Werte mit den Werten der bergab geführten Radwege verglichen, ist erkennbar, dass erstens der generelle Breitenbedarf bergab (maximaler Wert 35,19 %; vgl. **Tab. 15**) geringer ist als der Breitenbedarf bergauf (maximaler Wert 66,91 %; vgl. **Tab. 16**) und zweitens, dass bergauf eine Neigungsänderung einen größeren Einfluss auf den Breitenbedarf hat als bergab. Das lässt sich im Grunde auf die geringeren Geschwindigkeiten und die stärker aufzuwendenden Pedalkräfte, die benötigt werden, um bergauf voranzukommen, zurückführen. Das bedeutet, bergauf kommen größere Ausschläge der Fahrlinien zustande.

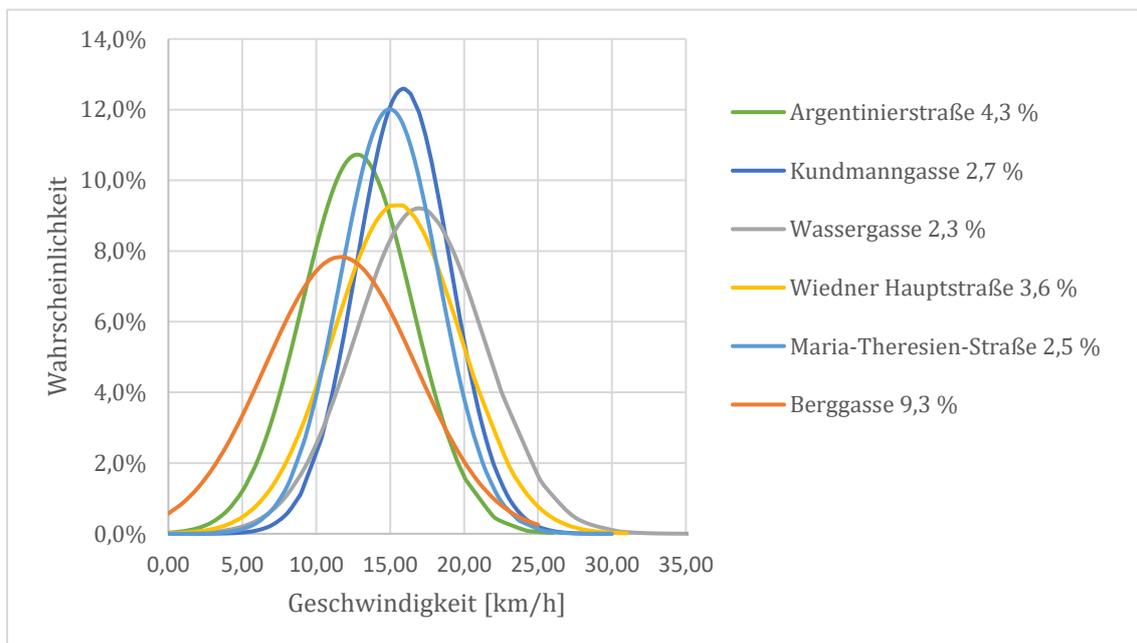


Abb. 31: Geschwindigkeitsverteilung im Vergleich bergauf

Tab. 16: Ergebnisse Breitenbedarf im Vergleich bergauf

Straßenname	Anzahl	Gefälle [%]	Mittelwert μ [Teile]	Anteil [%]
Argentinierstraße	177	4,3	2,49	62,22
Kundmanngasse	62	2,7	2,23	55,65
Wassergasse	58	2,3	2,13	53,13
Wiedner Hauptstraße	48	3,6	1,98	49,46
Maria-Th.-Straße	201	2,5	1,98	49,38
Berggasse	81	9,3	2,68	66,91

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Geschwindigkeiten primär durch das Gefälle eines Radweges beeinflusst werden. Das hat zur Folge, dass das Fahrverhalten ein anderes ist, ob bergauf mit größerem Kraftaufwand, oder bergab mit geringerem Kraftaufwand gefahren wird. Es kommt zu unterschiedlichen Fahrlinien und in weiterer Folge zu einem größeren Breitenbedarf. In den nachfolgenden beiden Diagrammen sind noch einmal resümierend die Neigungen mit den durchschnittlichen Geschwindigkeiten je Radweg (vgl. **Abb. 32**) und die Neigungen mit dem jeweiligen Breitenbedarf (vgl. **Abb. 33**) gegenübergestellt.

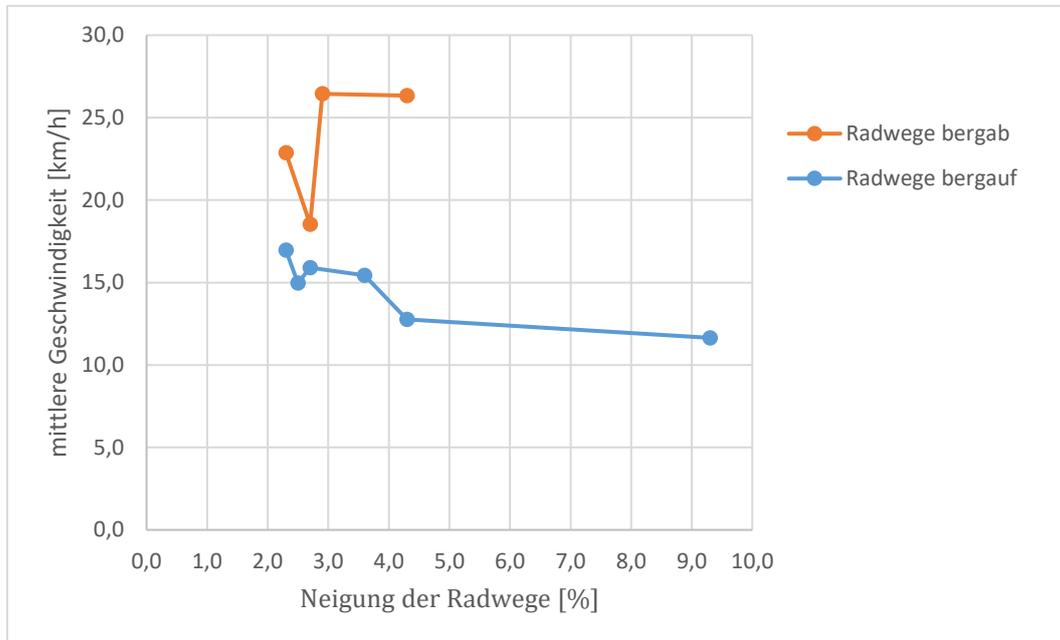


Abb. 32: Gegenüberstellung Neigungen der Radwege mit der mittleren Geschwindigkeit

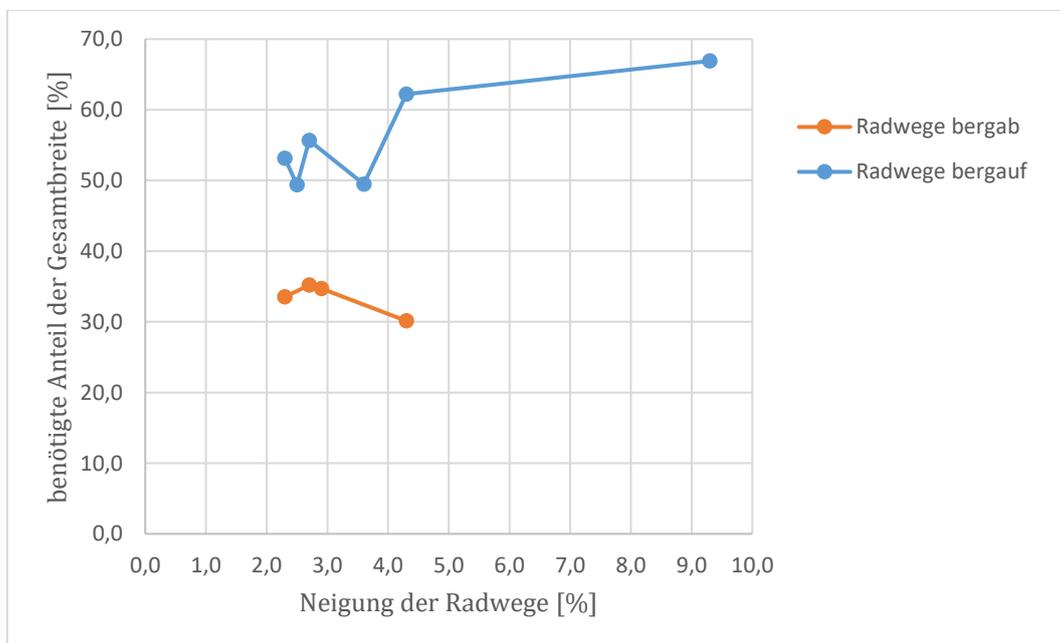


Abb. 33: Gegenüberstellung Neigungen der Radwege mit dem benötigten Anteil der Gesamtbreite

Ob nun ein Einrichtungsradweg bei gleicher Neigung bergauf breiter gestaltet werden muss, als einer der bergab verläuft, lässt sich nicht so einfach beantworten. Es kommen mehrere Faktoren zum Tragen, für die sich der jeweilige Planer verantwortlich fühlt.

Literaturverzeichnis

- [1] VCÖ Mobilität mit Zukunft-Publikation: Wie Städte die Mobilitätswende voranbringen, S.13, 03/2019, 978-3-903265-02-8
- [2] VCÖ Mobilität mit Zukunft-Umfrage: Potenzial des Fahrrads für Klimaschutz besser nutzen, S.1, 2017
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Der Radverkehr in Zahlen, S.33, Wien 2010
- [4] RVS 03.02.13: Radverkehr; FSV; S.19ff; Februar 2014
- [5] Wilfried Suhr, H. Joachim Schlichting (5/2007). Physik des Fahrradfahrens, Gleichgewicht auf zwei Rädern. Physik in unserer Zeit, 38, 238-241, 2007 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [6] Gert Franke, Wilfried Suhr, Falk Rieß. Warum ist Fahrradfahren so einfach?
- [7] GoPro; GoPro Hero5; <https://gopro.com/de/at/update/hero5>; (Stand 17.04.2020)
- [8] Barbara Schuster, 28.01.2019, Fahrradstraße oder Radhighway?; https://www.meinbezirk.at/wieden/c-lokales/fahrradstrasse-oder-radhighway_a3164184; (Stand: 18.04.2020)
- [9] Geodatenviewer der Stadtvermessung Wien; <https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/>; (Stand 20.04.2020)
- [10] Stadtplan Wien; <https://www.wien.gv.at/Stadtplan/>; (Stand 20.04.2020)

Anhang



Abb. 34: Kameraposition in der Kundmannsgasse (Zweirichtungsradweg) inkl. Rasterfläche

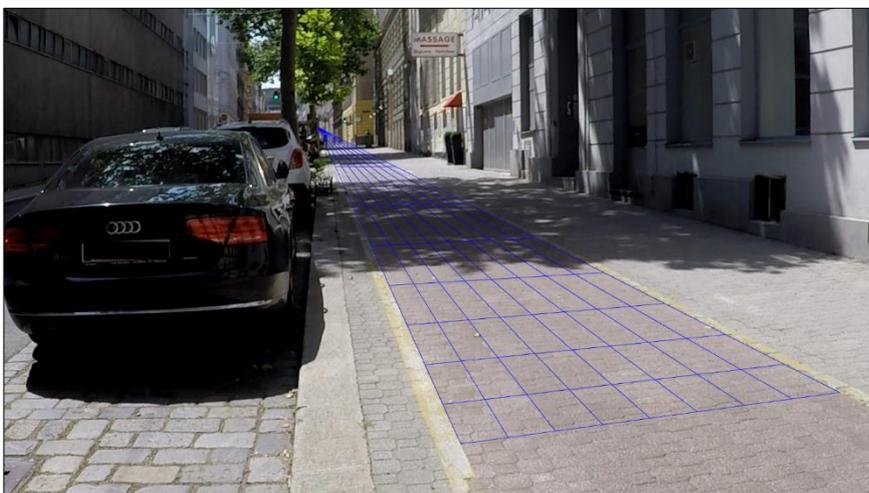


Abb. 35: Kameraposition in der Wassergasse (Zweirichtungsradweg) inkl. Rasterfläche

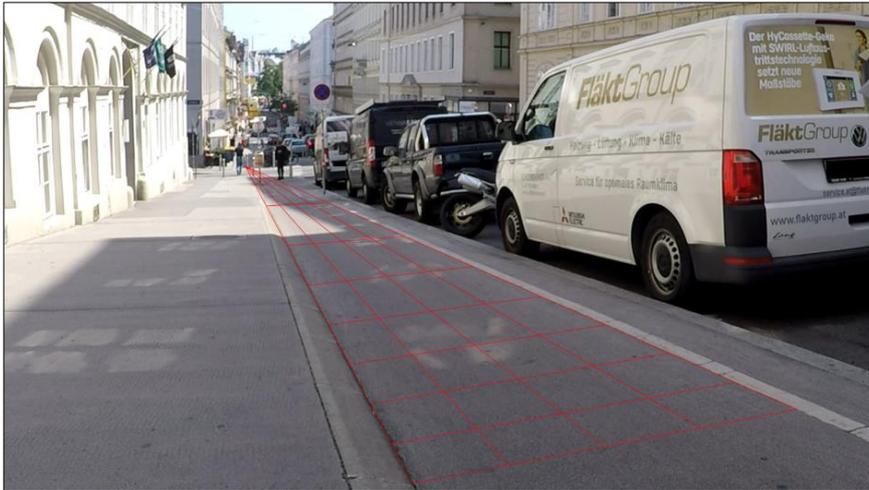


Abb. 36: Kameraposition in der Berggasse (Einrichtungsradeweg, bergauf) inkl. Rasterfläche



Abb. 37: Kameraposition in der Maria-Theresien-Straße (Einrichtungsradeweg, bergauf) inkl. Rasterfläche



Abb. 38: Kameraposition in der Wiedner Hauptstraße (Einrichtungsradeweg, bergab) inkl. Rasterfläche

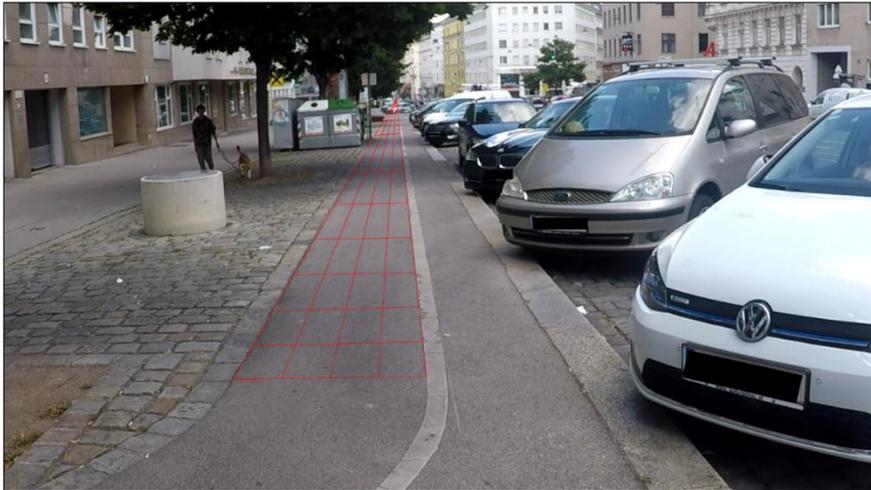


Abb. 39: Kameraposition in der Wiedner Hauptstraße (Einrichtungsradeweg, bergauf) inkl. Rasterfläche