



DIPLOMARBEIT Master Thesis

Einfluss der Fahrbahnoberflächen auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

(Betreuer/-innen) Ao.Univ.Prof. Mag. Dr. Günter Emberger

DI Tadej Brezina

E230

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

(Verfasser/-in)

Marko Toljić

0926905
Huttengasse 89
A-1160 Wien

Wien, am 10.01.2017

Marko Toljić

Kurzfassung

In vorliegender Arbeit wird der Einfluss der Fahrbahnoberflächen auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen untersucht. Dafür werden zunächst verschiedenste Zahlen und Fakten zu den Themen Sicherheit, Fahrradnutzung, Fahrradverfügbarkeit, Infrastruktur, Geschwindigkeit und Fahrbahnoberfläche sowie die Grundzüge der Fahr(rad)dynamik recherchiert, analysiert und kurz zusammengefasst.

Um weitere Umgebungsbedingungen, welche einen maßgebenden Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen haben, zu erfassen, wurde eine Umfrage erstellt und durchgeführt. Die Ergebnisse und daraus resultierenden Schlussfolgerungen dieser Befragung werden vorgestellt.

Darauf folgend wurden im Raum Wien Versuchsstrecken mit unterschiedlichen Oberflächen (glatter Asphalt, rauher Asphalt, flächige Radwegmarkierung, Beton, kleine ungleichmäßige und große gleichmäßige Pflastersteine sowie Schotter) ausgewählt, auf denen anschließend Geschwindigkeitsmessungen – von insgesamt 3750 zufällig vorbeifahrenden RadfahrerInnen – mit Hilfe einer Radarpistole durchgeführt wurden. Schlussendlich kann mit den gemessenen Geschwindigkeiten und der/dem angenommenen durchschnittlichen Körpergröße/-gewicht, die freiwillig aufgebrachte Leistung ermittelt und verglichen werden.

Zusätzlich wurde auf den Versuchsstrecken mit Hilfe des eingebauten Beschleunigungssensors eines am Fahrrad fixierten handelsüblichen Mobiltelefons die Rauheit der Oberfläche bestimmt. Aus den gemessenen Beschleunigungen wird die zufolge von Vibrationen zurückgelegte Strecke des Mobiltelefons in drei Richtungsachsen bestimmt und verglichen.

Die Auswertung der gesammelten Daten ergibt, dass auf den untersuchten Fahrbahnoberflächen folgende Geschwindigkeiten zu erwarten sind: $19,4 \leq v_{50} \leq 20,7$ km/h bzw. $23 \leq v_{85} \leq 25,5$ km/h. Lediglich am Schotterweg ($v_{50} = 17,4$ km/h) und auf der Betonoberfläche ($v_{50} = 23,7$ km/h) weichen die Geschwindigkeiten stärker ab, jedoch kann diese Abweichung auf den psychologischen Einfluss der unmittelbaren Umgebung der Fahrbahn zurückgeführt werden. Das Ergebnis zeigt, dass womöglich andere nicht berücksichtigbare bzw. unbekannte Faktoren den Einfluss der Fahrbahnoberfläche überwiegen.

Abstract

The purpose of this paper is to examine the influence of the roughness of different roadway surface types on cyclists' velocity choices. After researching the relevant facts and figures on infrastructure, speed, the impact of the roadway surface and bicycle dynamics, they are analysed and summarised. Additionally, a survey is employed to identify which environmental conditions have the biggest impact on velocity choices of cyclists.

The main part of the paper analyses the speed measurements of 3750 cyclists, which were performed using a radar gun and were taken on seven different surface types: smooth and rough asphalt, painted bicycle lanes, concrete, large and small cobblestones and gravel. The voluntarily expended power is calculated using the average cyclist's weight and height.

Additionally, by utilising the built-in accelerometer of an off-the-shelf smartphone and affixing it to a bicycle, the roughness of the surface types is determined by measuring three-dimensional accelerations over a fixed measuring distance. In order to investigate the impact of the suspension, a bicycle with a lockable suspension fork is used.

After processing the three dimensional data, the vertical component – in contrast to lateral and longitudinal accelerations – reveals to be of the highest quality and approximates the total accelerations best. A numerical integration approach is used to convert the acceleration data to covered distances. One aggregated value per surface type and fork stiffness remains to be used for comparison.

The analysis of the collected data shows the following ranges of the fifty and eighty-five percentile speeds of cyclists on different surface types: $19,4 \leq v_{50} \leq 20,7$ km/h, $23 \leq v_{85} \leq 25,5$ km/h, respectively. The only significant deviation, that was measured between gravel (17,4 km/h) and concrete surfaces (23,7 km/h), can be explained by the differing surroundings of the selected measurement tracks. Furthermore, the data shows no strict correlation between measured velocity and surface roughness, which suggests that other, in part unknown factors, which cannot be taken into account, outweigh the influence of the road surface.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	9
1.1	Motivation, Problemstellung & Zielsetzung.....	9
1.2	Methodik & Übersicht.....	10
2	Literaturrecherche.....	12
2.1	Zahlen & Fakten.....	12
2.1.1	Fahrrad & Sicherheit.....	12
2.1.2	Fahrrad & Nutzung	14
2.1.3	Fahrrad & Verfügbarkeit.....	16
2.1.4	Fahrrad & Infrastruktur	17
2.1.5	Fahrrad & Geschwindigkeit	18
2.1.6	Fahrrad & Fahrbahnoberfläche	20
2.2	Grundlagen der Fahr(rad)dynamik.....	20
2.2.1	Fahrradtypen	21
2.2.2	Das Laufrad.....	25
2.2.3	Widerstände	27
2.2.4	Andere Effekte.....	34
3	Umfrage.....	38
3.1	Aufbau	38
4	Standortwahl & relevante Einflüsse	39
4.1	Glatter Asphalt	42
4.2	Rauer Asphalt	43
4.3	Flächige Radwegmarkierung	44
4.4	Beton	45
4.5	Große, gleichmäßige Pflastersteine	46
4.6	Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine	47
4.7	Schotter	48
4.8	Gewachsener Boden.....	49
4.9	„TerraWay“- bzw. „Stabilizer“-Belag.....	49

5	Versuchsaufbau & Datenerhebung	50
5.1	Messgeräte	50
5.2	Vergleichsmessungen	51
5.3	Geschwindigkeitsmessungen	52
5.4	Bestimmung der Oberflächenrauheit über die Beschleunigung	52
6	Ergebnisse.....	54
6.1	Auswertung & Interpretation der Umfrageergebnisse	54
6.1.1	Primäre Umfrageergebnisse.....	55
6.1.2	Sekundäre Umfrageergebnisse	60
6.2	Auswertung & Interpretation der Vergleichsmessungen	64
6.3	Auswertung & Interpretation aller Geschwindigkeitsmessungen	67
6.4	Auswertung & Interpretation der Beschleunigungsmessungen Bestimmung & Bewertung der Oberflächenrauheit.....	73
6.5	Gegenüberstellung der Auswertungsergebnisse	76
7	Schlussfolgerung & Ausblick.....	79
8	Abbildungsverzeichnis.....	82
9	Tabellenverzeichnis	88
10	Literaturverzeichnis.....	89
11	Anhang.....	91

1 Einleitung

Die Menschheit befindet sich weltweit in einer Phase der Urbanisierung - die Bevölkerung am Land nimmt ab und steigt in den Städten. Im Jahr 2014 lebten weltweit 54 %¹ und europaweit 73 %² der Bevölkerung in städtischen Regionen³. Österreich ist dabei keine Ausnahme - hierzulande sind es bereits 66 %⁴ der Bevölkerung. Allein bis zum Jahr 2025 ist in Wien ein Bevölkerungswachstum von nahezu 10 %⁵ prognostiziert. Dadurch steigen naturgemäß auch die verkehrlichen Herausforderungen und Konfliktpotentiale, welche es zu bewältigen gilt. Für diese Herausforderung wurde in Wien mit dem Stadtentwicklungsplan 2025 (STEP 2025) bereits der Grundstein gelegt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird neben der gesamtösterreichischen Verkehrssituation insbesondere auf die verkehrliche Situation in Wien eingegangen, da in dieser Region die für diese Arbeit erforderlichen Geschwindigkeitsmessungen erfolgen.

1.1 Motivation, Problemstellung & Zielsetzung

Um der aktuellen und zukünftigen Zuwanderung in Kernzonen und dem somit steigenden Verkehrsaufkommen gerecht zu werden, wurde im STEP 2025 die Förderung des multimodalen Verkehrs beschlossen und im zugehörigen „Fachkonzept Mobilität“ durch folgende Ziele konkretisiert:

- Erhöhung des Flächenanteils von Fuß-, Rad- und öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV)
- Erhöhung von aktiver Bewegung und Verringerung von verkehrsbedingten Verletzten sowie Verkehrstoten
- Erhöhung des Anteils an Wegen die zu Fuß oder mit dem Rad zurückgelegt werden
- Erhöhung des Anteils des Umweltverbunds⁶ am Modal Split von aktuell (2012) 73 % auf 80 % im Jahre 2025 und damit einhergehender Reduktion des motorisierten Individualverkehrs (MIV) auf 20 %
- Reduktion der CO₂-Emissionen durch Erhöhung der Verlässlichkeit des ÖPNV, durch Erhöhung der Fahrradverfügbarkeit sowie Erreichbarkeit von Leihradstationen und Carsharing-Anlagen
- Verbesserung der Ressourceneffizienz durch die Senkung des Endenergieverbrauchs im Wiener Verkehr⁷

¹ Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015 S. xxi

² ibid.

³ Regionen bestehen aus einer Kernzone und dazugehörigen Außenzonen. Außenzonen sind hierbei Zonen aus denen 30% der Volljährigen mindestens einmal täglich in die dazugehörige Kernzone pendeln. (vgl. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015 S. 102)

⁴ Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015 S. 200

⁵ Stadtentwicklung Wien, Magistratsabteilung 18: Stadtentwicklung und Stadtplanung, 2014 S. 15

⁶ Gesamtheit aus Fuß-, Rad- und öffentlichen Verkehrs (vgl. Stadtentwicklung Wien, Magistratsabteilung 18: Stadtentwicklung und Stadtplanung, 2014 S. 124).

⁷ ibid.

Aus den oben angeführten Zielen geht eindeutig hervor, dass das Fahrrad, neben dem Fuß- und öffentlichem Personennahverkehr, einen der Schlüssel zum Erfolg darstellt. Mit Hilfe dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Erreichung dieser Ziele geleistet und die Planung von Radfahranlagen sowie Begegnungszonen hinsichtlich der eingesetzten Oberflächen bzw. Materialien unterstützt werden. Beispielsweise wäre es denkbar in Begegnungszonen die eingesetzte Oberfläche so zu wählen, dass RadfahrerInnen freiwillig eine niedrigere Geschwindigkeit wählen, ohne gleichzeitig auf Fahrkomfort verzichten zu müssen. Umgekehrt ist auf Radwegen eine Oberfläche, welche das Vorankommen erleichtert, ohne dabei die Sicherheit der RadfahrerInnen zu gefährden, sinnvoller. Das Ziel dieser Arbeit ist es somit folgende Fragen zu beantworten:

FRAGE 1: Welchen Einfluss hat die Fahrbahnoberfläche auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen?

FRAGE 2: Welche weiteren Wirkungsgrößen haben einen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen und wie hoch ist der Stellenwert dieser, im Vergleich zum Einfluss der Fahrbahnoberfläche?

1.2 Methodik & Übersicht

Anfangs erfolgte eine Literaturrecherche mit den Diensten „CatalogPlus“ der Universitätsbibliothek der Technischen Universität Wien, „ieeexplore.ieee.org“ eine digitale Bibliothek des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) sowie „scholar.google.at“ ein Online-Suchdienst für wissenschaftliche Literatur von Google um herauszufinden, ob zu der in dieser Arbeit behandelten Thematik bereits Arbeiten/Studien oder dergleichen veröffentlicht wurden. Zusätzlich wurden allgemeine Zahlen und Fakten zu den Themen Fahrdynamik von Fahrrädern, Radnutzung und Radverfügbarkeit von verschiedensten Quellen zusammengetragen, um einen Überblick über die aktuelle Situation zu bekommen. Auf das Ergebnis der Literaturrecherche wird im Abschnitt 2.1 näher eingegangen. Im Abschnitt 2.2 folgt eine kurze Zusammenfassung der Fahrdynamikgrundlagen von Fahrrädern in welcher die verschiedenen physikalischen Einflüsse auf das Fahrverhalten aufgezeigt werden. Im weiteren Verlauf werden die so gewonnenen Daten um die Ergebnisse einer durchgeführten Online-Umfrage ergänzt. Die Umfrage soll eine statistische Grundlage zu den Themengebieten schaffen, zu denen durch die Literaturrecherche nicht genügend bzw. keine Informationen gefunden wurden. Dies betrifft insbesondere die Beantwortung von **Frage 2**. Um eine hohe Teilnehmeranzahl zu erreichen, erfolgte die Verbreitung der Umfrage sowohl durch soziale Medien als auch über verschiedene fahrradnahe Organisationen. Auf den Aufbau der Umfrage wird in Abschnitt 3 näher eingegangen, während die Umfrageergebnisse in Abschnitt 6.1 dargestellt und analysiert sind.

Die aus der Literaturrecherche und aus der Online-Umfrage gewonnenen Daten bilden das Grundgerüst, auf dessen Basis die Geschwindigkeitsmessungen von RadfahrerInnen erfolgten. Hierfür wurden im Raum Wien geeignete Messpunkte/Standorte ausfindig gemacht/gewählt. Für die Standortwahl sind unter anderem folgende Faktoren bzw. Einflüsse, welche im Abschnitt 4 näher betrachtet werden, maßgebend:

- die Trassierungsparameter (Längsneigung, Kurvenradius, etc.)
- die Verkehrsdichte
- die Verkehrszusammensetzung (reiner Radverkehr oder in Kombination mit anderen VerkehrsteilnehmerInnen)
- die Oberfläche bzw. das Fahrbahnmaterial
- die Umgebungsbedingungen (Wind- und Sichtverhältnisse)

Nachdem die Standorte gewählt wurden (siehe Abschnitt 4), folgt in Abschnitt 5 die Beschreibung der Messgeräte und der grundsätzliche Ablauf der Messungen.

Hier wird unterschieden zwischen: Versuchsmessungen (siehe Abschnitt 5.2), darauf aufbauende Geschwindigkeitsmessungen (siehe Abschnitt 5.3) und Rauheitsmessungen (siehe Abschnitt 5.4). Auf die Messergebnisse wird in Abschnitt 6 näher eingegangen. Die Geschwindigkeitsmessungen von an den Messpunkten zufällig vorbeifahrenden RadfahrerInnen, wurden mit einer Radarpistole des Typs Stalker II durchgeführt, während die dazugehörigen Windgeschwindigkeiten mit einem Anemometer gemessen wurden. Mit Hilfe der ausgewerteten Fahr- und Windgeschwindigkeiten, dem durchschnittlichen österreichischen Körpergewicht sowie der durchschnittlichen österreichischen Körpergröße kann schlussendlich die freiwillig erbrachte Leistung berechnet werden.

Im weiteren Verlauf wurde mittels des Beschleunigungssensors (MPU6516) eines am Fahrrad angebrachten Mobiltelefons (LG Nexus 5), welches während der Fahrt die Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtung (Telefonachsen) misst, die Oberflächenrauigkeit der jeweiligen Oberfläche bestimmt. Pro Oberflächenart erfolgten auf einer vordefinierten Länge mehrere Versuchsfahrten, jeweils mit aktivierter und starr geschalteter Feder. Um vergleichbare Sensordaten zu erhalten, erfolgte die Messung bei vordefinierter Anfangsgeschwindigkeit, ohne weiterer Beschleunigung. Die Geschwindigkeit wurde über einen Geschwindigkeitssensor (Geschwindigkeits- & Trittfrequenz-Sensor von Runtastic) gemessen. Anschließend können aus den in Abschnitt 6 ermittelten Ergebnissen die notwendigen Schlüsse gezogen werden, um in Abschnitt 7 die eingangs gestellten Fragen zu beantworten. Zu guter Letzt folgt der Ausblick zu dieser Forschungsthematik.

2 Literaturrecherche

Um eine Ausgangsbasis zum Thema Fahrrad zu schaffen, wird in diesem Abschnitt einleitend auf allgemeine Zahlen und Fakten zu den Themengebieten Mobilitätsverhalten, Radnutzung und Verkehrssicherheit eingegangen. Weiterführend werden die Grundlagen der Fahr(rad)physik aufgearbeitet und dargestellt.

2.1 Zahlen & Fakten

Zu den Themen Mobilitätsverhalten, Radnutzung und Verkehrssicherheit gibt es eine Vielzahl an Untersuchungen und Umfragen:

- Straßenverkehrsunfälle – Österreich: Basic Fact Sheet 2009 – Radfahrer (Bundesanstalt für Verkehr)
- Radverkehr in Zahlen – Daten, Fakten und Stimmung – 2013 (BMVIT)
- Radverkehrserhebung Wien - Entwicklungen, Merkmale und Potenziale; Werkstattbericht Nr. 114, 2010 (Stadtentwicklung Wien, MA 18: Stadtentwicklung und Stadtplanung)
- Mobilitätsverhalten und Mobilitätstypen in Österreich, 2013 - Executive Summary (SORA - Institute for Social Research and Consulting [Hrsg.]
- Radverkehr und Klimaschutz, 2009 (Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut)

Daraus folgen nun einige interessante und für diese Arbeit wesentlichen Auszüge. Um die einzelnen Abbildungen leichter miteinander vergleichen zu können sind die unterschiedlichen Kategorien farbkodiert: Alter (**Blau**), Ortsgröße bzw. Urbanisierungsgrad (**Grau**), Mobilitätstyp (**Gelb**).

2.1.1 Fahrrad & Sicherheit

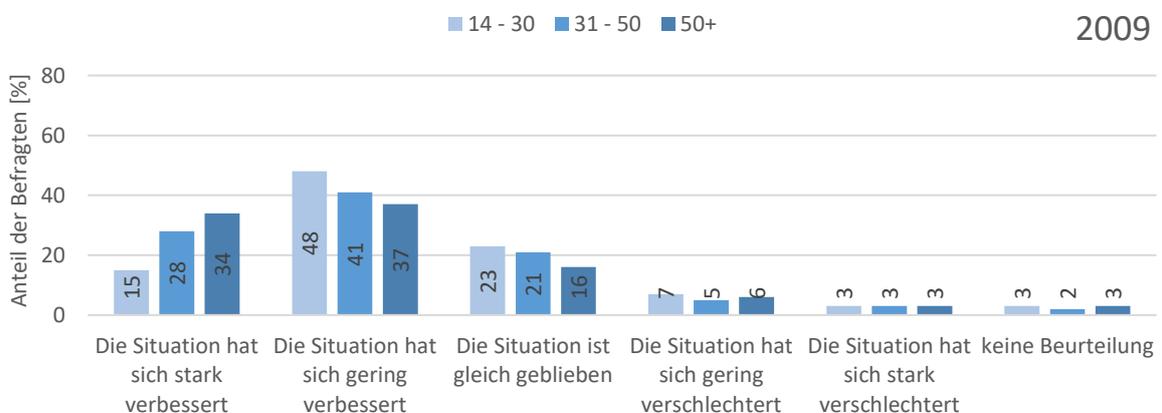


Abb. 1: Wie hat sich die Situation für das Radfahren in den letzten Jahren verändert? – nach Alter (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)

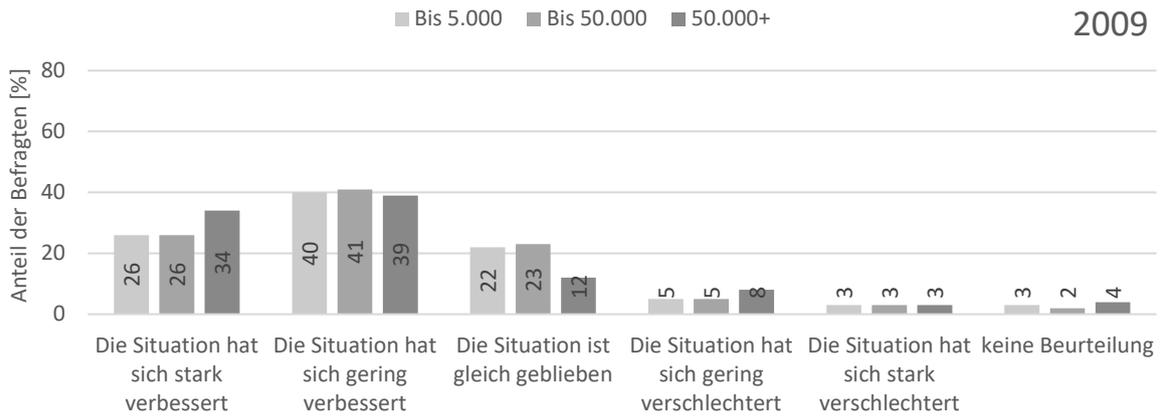


Abb. 2: Wie hat sich die Situation für das Radfahren in den letzten Jahren verändert? – nach Ortsgröße
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)

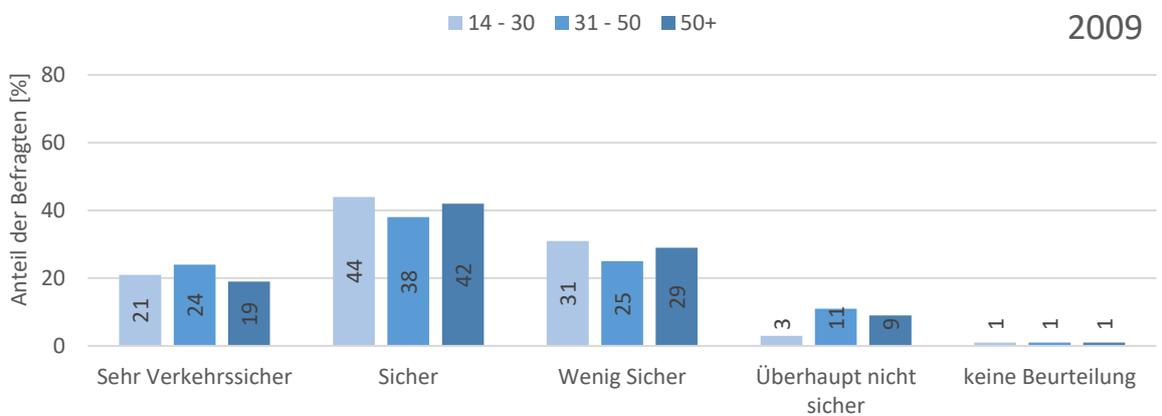


Abb. 3: Wie verkehrssicher fühlen Sie sich beim Radfahren? – nach Alter
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)

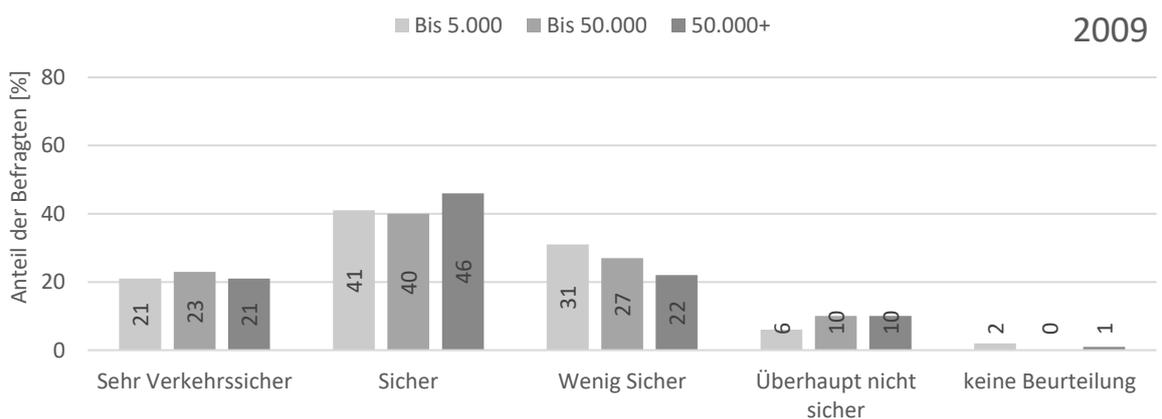


Abb. 4: Wie verkehrssicher fühlen Sie sich beim Radfahren? – nach Ortsgröße
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)

Anhand von **Abb. 1** bis **Abb. 4** ist ersichtlich, dass die Maßnahmen und Bemühungen im Bereich der Verkehrssicherheit von RadfahrerInnen bis zum Jahr 2009 durchaus Fortschritte brachten und sich dadurch das subjektive Sicherheitsgefühl der Befragten erhöht hatte. Ein ähnliches Ergebnis (siehe **Abb. 57** und **Abb. 58** auf S. 63) hat auch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Umfrage ergeben.

Bemerkenswert ist, dass dieser Effekt über die verschiedenen Altersstufen und Ortsgrößen hinweg gleichmäßig zu beobachten ist, obwohl, wie aus **Abb. 5** ersichtlich wird, die Anzahl der Unfälle, in denen RadfahrerInnen beteiligt waren, seit 2010 tatsächlich gestiegen ist. In diesem Kontext muss allerdings auch erwähnt werden, dass die Steigerung der Unfallzahlen möglicherweise mit dem langsam steigenden Radverkehrsanteil (Steigerung von 2 % in Zeitraum von 2006-2011)⁸ in Verbindung steht.

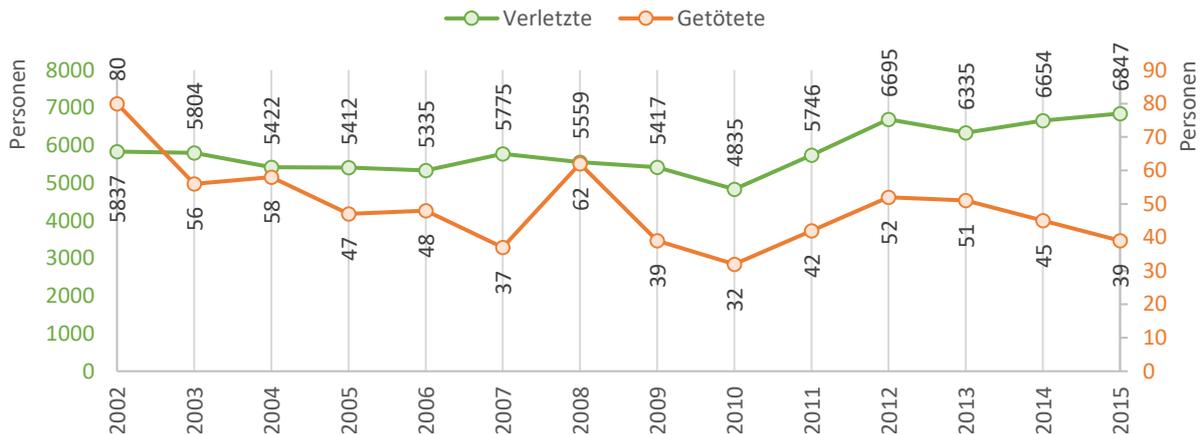


Abb. 5: Anzahl der bei Unfällen verletzten und getöteten RadfahrerInnen in den Jahren 2002 - 2015 (Quelle: STATISTIK AUSTRIA, 2016)

2.1.2 Fahrrad & Nutzung

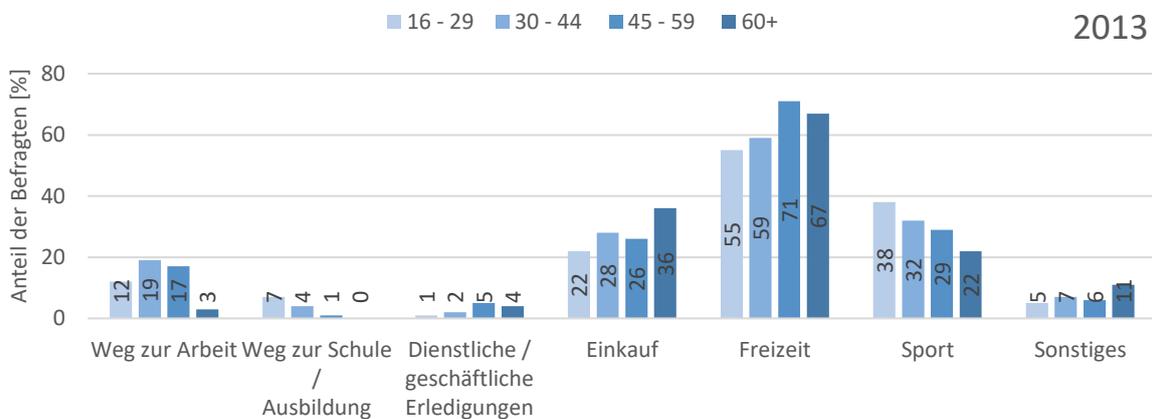


Abb. 6: Welche Wege im Alltag fahren Sie zumindest gelegentlich bis zum Ziel mit dem Fahrrad? – nach Alter (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)

⁸ BMVIT, 2013 S. 34

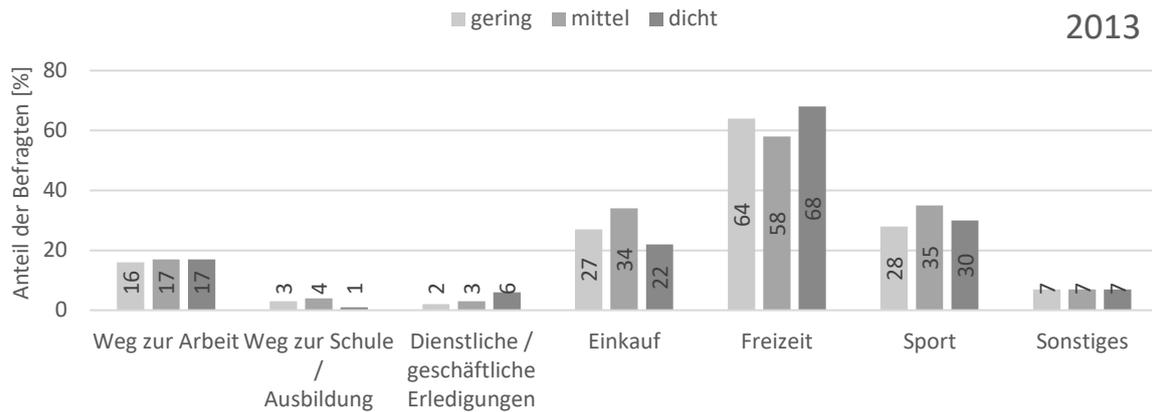


Abb. 7: Welche Wege im Alltag fahren Sie zumindest gelegentlich bis zum Ziel mit dem Fahrrad? – nach Urbanisierungsgrad (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)

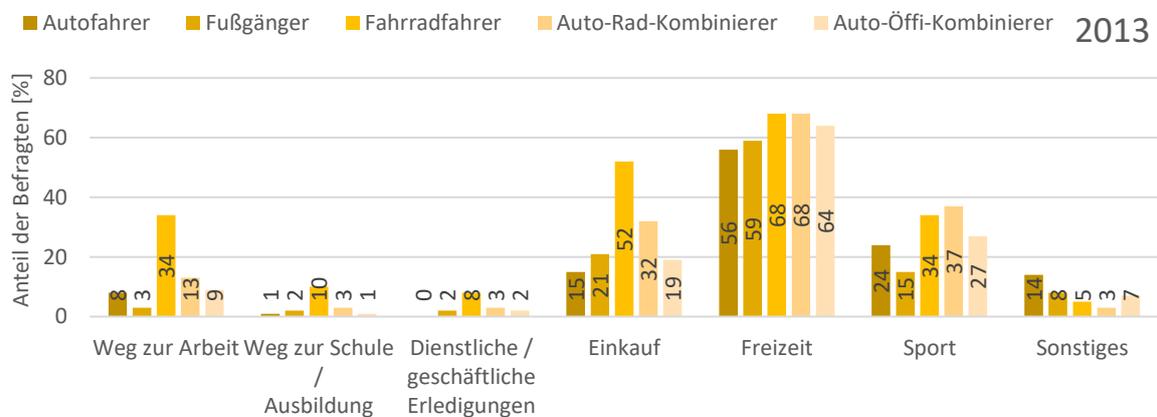


Abb. 8: Welche Wege im Alltag fahren Sie zumindest gelegentlich bis zum Ziel mit dem Fahrrad? – nach Mobilitätstyp (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)

Abb. 6 bis Abb. 8 verdeutlichen, dass das Fahrrad im Jahre 2013 unabhängig von Alter, Ortsgröße und Mobilitätstyp überwiegend im Rahmen von Freizeitaktivitäten seine Verwendung gefunden hat. Gleich darauf folgt die Verwendung bei den Kategorien "Einkauf", "Sport" und "Weg zur Arbeit". Aus **Abb. 8** geht deutlich hervor, dass Personen mit dem Mobilitätstyp „Fahrradfahrer“ wie erwartet, das Fahrrad auch außerhalb der Freizeit für andere Wege häufiger verwenden als Personen die einem anderen Mobilitätstyp zugeordnet sind. Der Vergleich mit den Umfrageergebnissen aus **Abb. 56** auf S. 63 zeigt, dass sich die alltägliche Fahrradnutzung auch vermehrt auf die Bereiche „Weg zur Arbeit“, „Weg zur Schule / Ausbildung“ sowie „Dienstliche / geschäftliche Erledigungen“ ausgeweitet hat.

2.1.3 Fahrrad & Verfügbarkeit

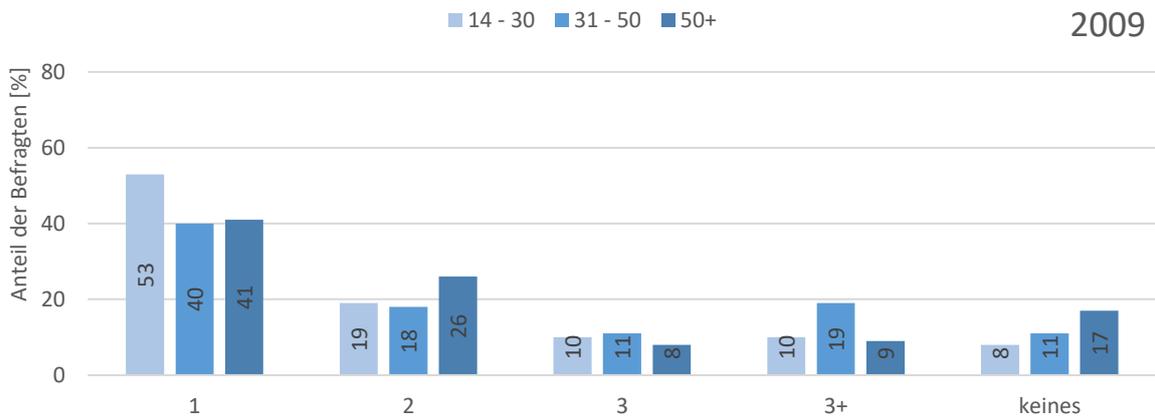


Abb. 9: Wie viele Fahrräder besitzen Sie? – nach Alter
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)

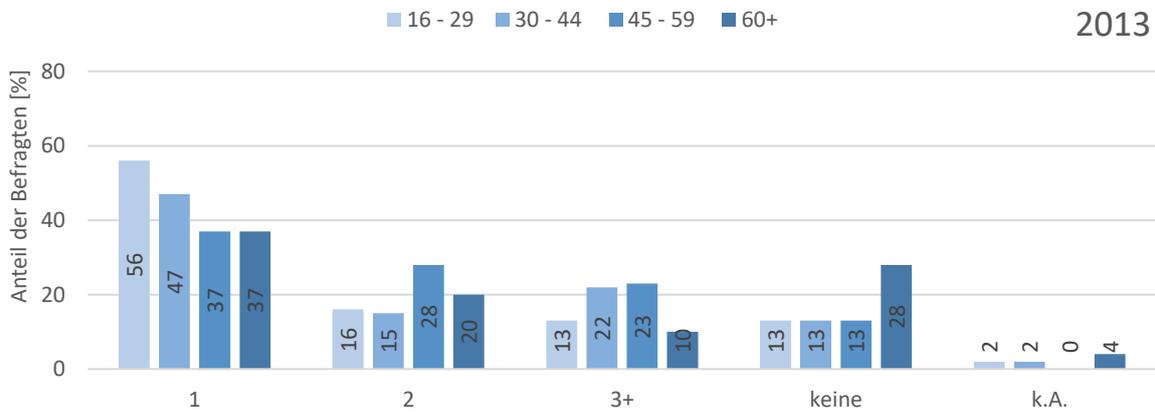


Abb. 10: Wie viele funktionstüchtige Fahrräder besitzen Sie? – nach Alter
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)

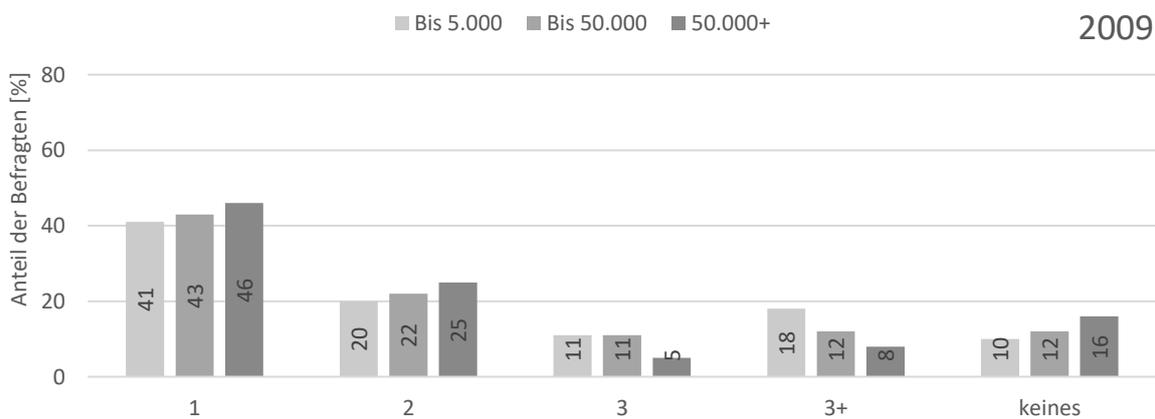


Abb. 11: Wie viele Fahrräder besitzen Sie? – nach Ortsgröße
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)

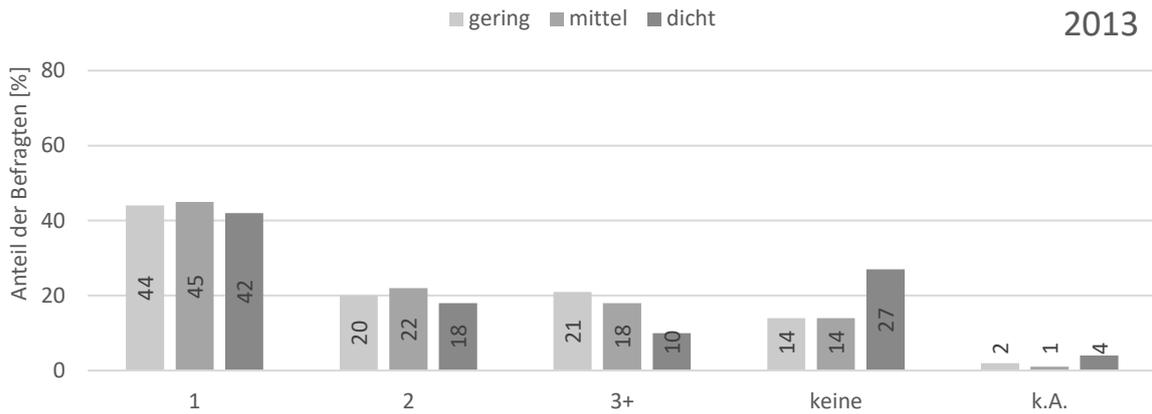


Abb. 12: Wie viele funktionstüchtige Fahrräder besitzen Sie? – nach Urbanisierungsgrad
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)

Abb. 9 und **Abb. 10** zeigen, dass jüngere Personen nur ein bis zwei Fahrräder besitzen und erst im Laufe des Lebens weitere erwerben. Auffällig ist, dass die Fahrradverfügbarkeit im Zeitraum von 2009 bis 2013 generell über alle Altersgruppen hinweg gleichmäßig gesunken ist. Laut **Abb. 11** und **Abb. 12** ist besonders in dichter besiedelten Gebieten ein stärkerer Rückgang als in Gegenden mit niedrigerer Bevölkerungsdichte zu verzeichnen.

2.1.4 Fahrrad & Infrastruktur

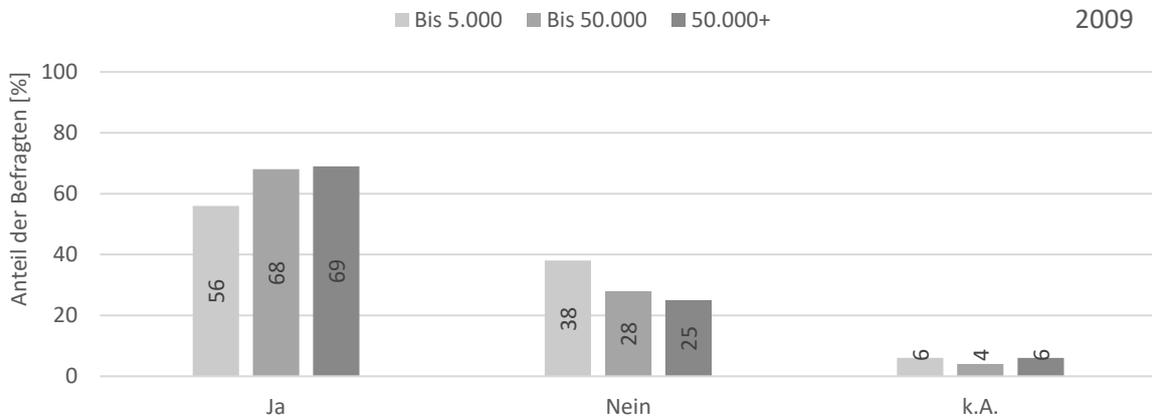


Abb. 13: Gibt es in Ihrer Umgebung ausreichend Fahrradabstellanlagen? – nach Ortsgröße
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)



Abb. 14: Gibt es in Ihrem Wohnhaus ausreichend Fahrradabstellanlagen? – nach Urbanisierungsgrad
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)

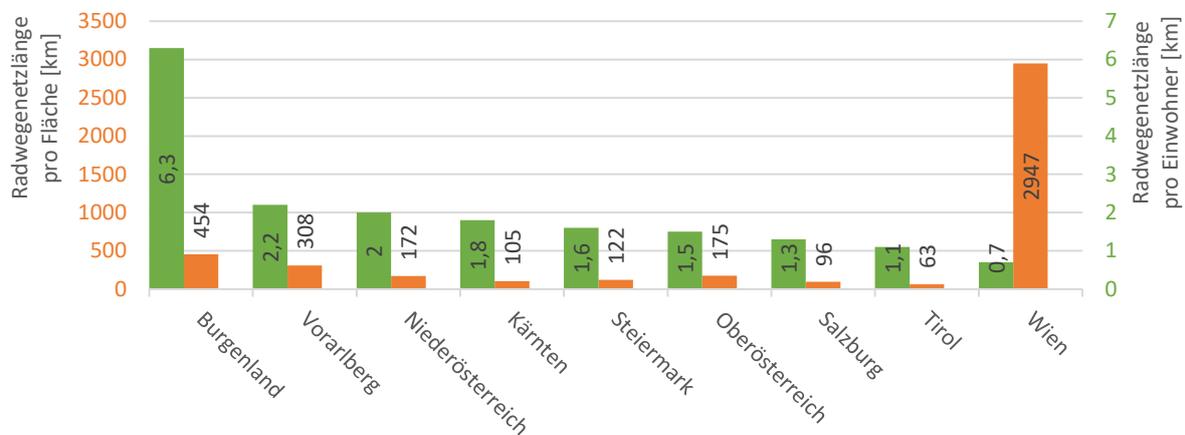


Abb. 15: Radwegenetzlänge pro Fläche und Einwohner – nach Bundesländern
(Quelle: eigene Darstellung nach BMVIT, 2013)

Anhand der **Abb. 13** und **Abb. 14** ist ersichtlich, dass die Anzahl der Abstellplätze im Zeitraum von 2009 bis 2013 in gering bis mittel besiedelten Gebieten stark gestiegen ist, während sie in dicht besiedelten Gebieten hingegen rückläufig ist. Bezüglich der Infrastruktur wären neben der Anzahl der Abstellplätze und der Länge des Radwegenetzes (siehe **Abb. 15**) auch die Art der Anlagen sowie deren baulicher Zustand interessant, jedoch wurde für Österreich keine aussagekräftige Literatur dazu gefunden.

2.1.5 Fahrrad & Geschwindigkeit

Im Jahre 1990 wurde eine Untersuchung mit dem Titel „Geschwindigkeit von Radfahrern im Stadtverkehr“ veröffentlicht, worin die im Berliner Stadtverkehr gefahrenen Geschwindigkeiten von RadfahrerInnen gemessen wurde. Dabei wurden die Geschwindigkeiten von insgesamt 1100 RadfahrerInnen auf einer vorab abgemessenen Strecke mittels Stoppuhr ermittelt. Neben der Geschwindigkeit wurde auch das Geschlecht und das (geschätzte) Alter jedes/jeder Radfahrers/Radfahrerin erfasst. Das Ergebnis dieser Untersuchung kann in drei Punkten zusammengefasst werden:

- „Männer fahren durchschnittlich schneller Fahrrad im Stadtverkehr als Frauen
- Wichtige Einflussgrößen auf die Geschwindigkeit: Alter, Witterungs- und Verkehrsverhältnisse
- Fahrradart und Ausstattung sind von untergeordneter Bedeutung für die Geschwindigkeit“⁹

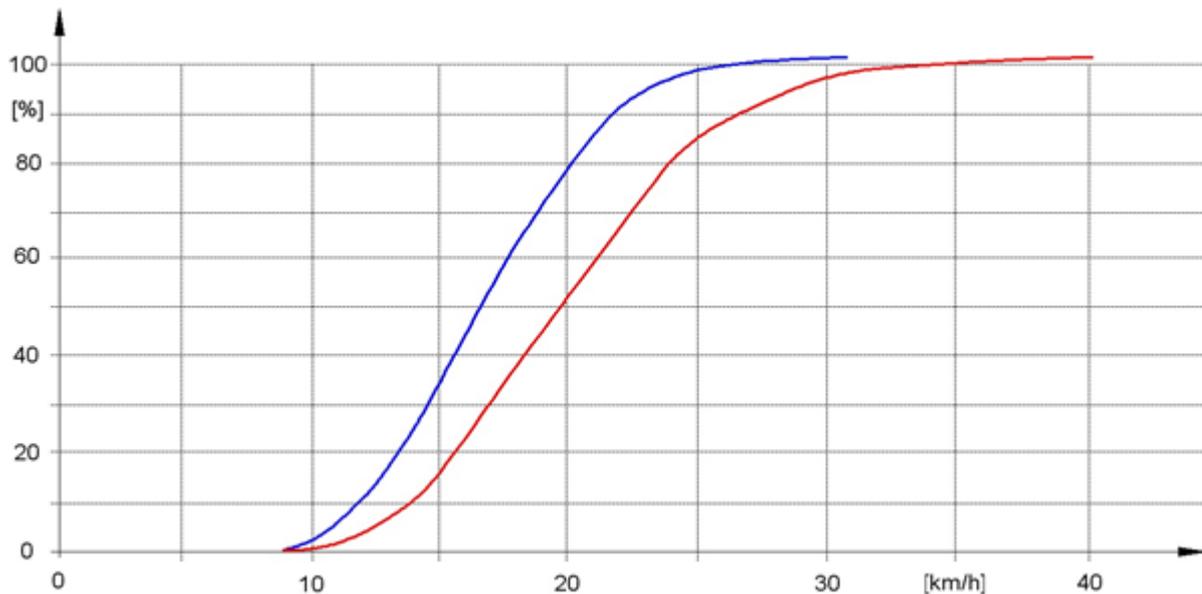


Abb. 16: Summenhäufigkeitsverteilung der gemessenen Geschwindigkeiten nach Geschlecht aus dem Jahr 1990
– Männer (rot) Frauen (blau) (Quelle: ClaimMS GmbH, 2011)

Der erste der drei oben angeführten Punkte wird in **Abb. 16** verdeutlicht: Die Geschwindigkeiten der Männer betragen durchschnittlich 20 km/h, während Frauen etwa 16,6 km/h erreichten, woraus sich eine Differenz von 3,4 km/h ergibt. Die in 85 % der Fälle erreichte maximale Geschwindigkeit betrug bei Männern 25 km/h und bei Frauen 21 km/h. Im oberen Geschwindigkeitsbereich fiel die Differenz zwischen den Geschlechtern mit 4 km/h noch etwas höher aus.

Weitere/Aktuellere Daten wurden auf Anfrage vom Unternehmen BikeCityGuide Apps GmbH zur Verfügung gestellt. Das Unternehmen bietet die Anwendung „Bike Citizens Fahrrad Navi GPS“ (Navigationssystem für RadfahrerInnen) an. Die Daten enthalten die mittlere gefahrene Geschwindigkeit, Distanz und Fahrdauer von RadfahrerInnen in den Städten Wien, Graz, Linz und Salzburg.

Tab. 1: Ausgewertete Nutzerdaten der Anwendung „Bike Citizens Fahrrad Navi GPS“ der Städte Wien, Graz, Linz und Salzburg (Quelle: Kulhanek, 2016)

	Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	Mittlere Distanz [km]	Mittlere Dauer [min]
Wien	15,9	5,4	20,4
Graz	17,1	4,4	15,6
Linz	16,5	5,9	21,9
Salzburg	16,6	4,4	16,3

⁹ Rau, et al., 1990 S. 176-178 zitiert nach ClaimMS GmbH, 2011

Aufgrund der, aus geschäftlichen Gründen, unbekanntem Nutzerzahlen kann hier kein gewichteter Mittelwert gebildet werden. Es kann daher lediglich ein Geschwindigkeitsbereich von 15,9 - 17,1 km/h angegeben werden. Zu den in **Tab. 1** genannten Daten wurde noch folgendes angemerkt:

„Anzumerken ist, dass besonders die Daten von Linz und Salzburg aufgrund der geringeren Verbreitung eine höhere Schwankungsbreite aufweisen - anzunehmen ist dass die App hier eher von "überzeugteren" Radfahrern benutzt wird, in Wien durch die freie Verfügbarkeit ein wesentlich breiteres Publikum erreicht werden kann. Die hohe Grazer Durchschnittsgeschwindigkeit könnte daraus resultieren, dass wir selbst die App regelmäßig benützen (was bei 20 Mitarbeitern schon was ausmacht) und dabei eher schnell unterwegs sind und zusätzlich die App auch recht häufig in der "Botenszene" benutzt wird - welche ja auch nicht gerade für ihre langsame Fahrweise bekannt sind.“¹⁰

2.1.6 Fahrrad & Fahrbahnoberfläche

An der Universität Oldenburg wurde 1993 von Thomas Senkel eine Studie mit dem Titel „Plädoyer für einen guten Reifen“ veröffentlicht. Mit einem eigens dafür konstruierten Messdreirad wurden die Rollwiderstände von zahlreichen Fahrradreifen auf PVC-Belag bestimmt und verglichen. Dabei wurde unter anderem erkannt, dass

„[...] bei ansonsten gleicher Bauart und gleichen Parametern« breite Reifen einen kleineren Rollwiderstand als schmale Reifen haben [...]“¹¹

Bezüglich der Fahrbahnoberfläche wurde folgendes festgehalten:

„Der Rollwiderstand hängt natürlich auch von der Fahrbahnoberfläche ab. Für übliche Radwege aus Betonsteinen oder Asphalt liegen die Werte etwa 20 – 50 % höher als auf PVC-Boden. Bei sehr weichen Untergründen, wie z. B. Gras oder Sand, sind die Verformungen des Bodens die Hauptursache für den Rollwiderstand, der dann ein Vielfaches der Werte auf PVC beträgt.“¹²

2.2 Grundlagen der Fahr(rad)dynamik

Einleitend werden in diesem Abschnitt die einzelnen Fahrradtypen, der Radaufbau, die Eigenschaften des Laufrades in Bezug auf die Widerstände sowie die, während der Fahrt auftretenden, physikalischen Effekte erläutert. Anschließend werden die Rahmenparameter und deren Einfluss auf die Fahreigenschaften aufgezeigt.

¹⁰ Kulhanek, 2016

¹¹ Senkel, 1993

¹² ibid.

2.2.1 Fahrradtypen

Allgemein lassen sich klassische Fahrräder in vier Kategorien einteilen: Cityräder, Trekkingräder, Reiseräder und Sporträder¹³. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Kategorien sind vielfältiger Natur und werden nun nachfolgend kurz vorgestellt. Natürlich gibt es noch weitere Fahrradtypen wie z.B.: das Faltrad, Lastenrad und Hollandrad, jedoch wird aufgrund des bereits großen Umfangs der Materie nicht näher darauf eingegangen.

2.2.1.1 Cityrad

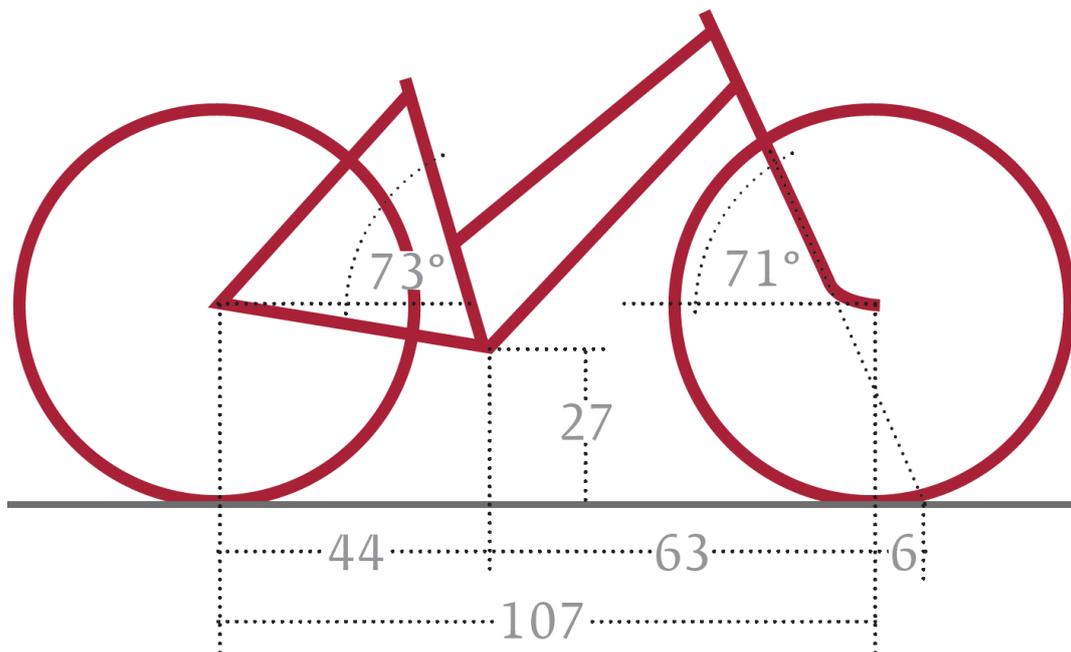


Abb. 17: Gängige Rahmengenometrie eines Cityrades [cm]
(Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013)

Das Cityrad mit aufrechter Sitzposition wird vorwiegend für kürzere Alltagstrecken verwendet und hat wegen dem häufigen Auf- und Absteigen einen (Aluminium-)Rahmen mit tiefem und dickem Hauptrohr. Allerdings sind auch Trapezrahmen durchaus üblich. Das Sitz- und Steuerrohr sind passend zur Sitzposition flacher geneigt; dies begünstigt den Geradeauslauf. Die Laufradgröße beträgt meist 28 Zoll, aber auch kleinere Durchmesser wie 20 und 26 Zoll sind gängig. Zur übrigen Ausstattung gehören Gabelfedern, V-Bremsen, (in seltenen Fällen) Rücktrittsbremsen, Nabenschaltung, Gepäckträger, Kettenschutz, Seitenständer und eine per Dynamo mit Strom versorgte Beleuchtungsanlage.

¹³ Barzel, et al., 1. Auflage 2008

2.2.1.2 Trekkingrad

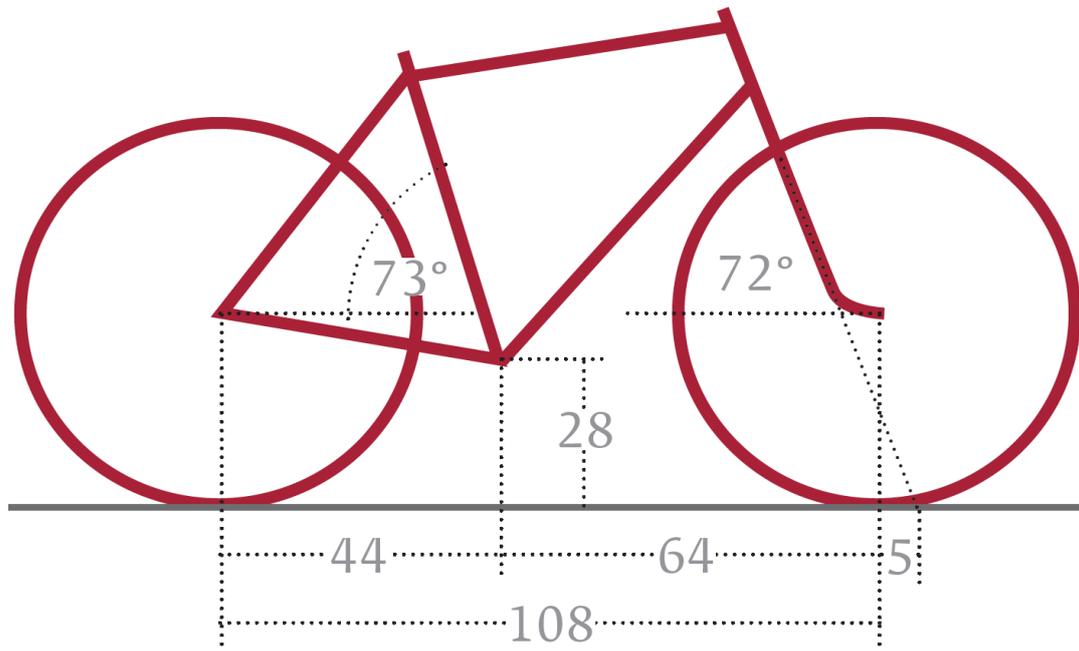


Abb. 18: Gängige Rahmengenometrie eines Trekkingrades [cm]
 (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013)

Dieses mit zwischen 60 und 45 Grad geneigter Sitzposition gefahrene Fahrrad ist neben befestigten Straßen auch für unbefestigte Wege geeignet und ist somit als Allrounder zu bezeichnen. Der (Aluminium-)Rahmen ist meist als Trapez- oder Diamantrahmen ausgeführt. Das Sitz- und Steuerrohr sind etwas stärker geneigt, wodurch das Fahrrad wendiger wird. Dies ist besonders auf unbefestigten Wegen von Vorteil. Die Laufradgröße bewegt sich, ähnlich dem Cityrad, im Bereich von 26 bzw. 28 Zoll. Im Normalfall ist nur das Vorderrad mit einer Gabelfederung ausgestattet; bei teureren Modellen ist zusätzlich eine Rahmenfederung zu finden. Zur restlichen Ausstattung gehören eine 27-Gang Kettenschaltung, V-Bremsen (auch hydraulische Felgenbremsen oder Scheibenbremsen sind üblich), ein Gepäckträger, ein Nabendynamo, Kunststoffschutzbleche sowie ein Seitenständer.

2.2.1.3 Reiserad

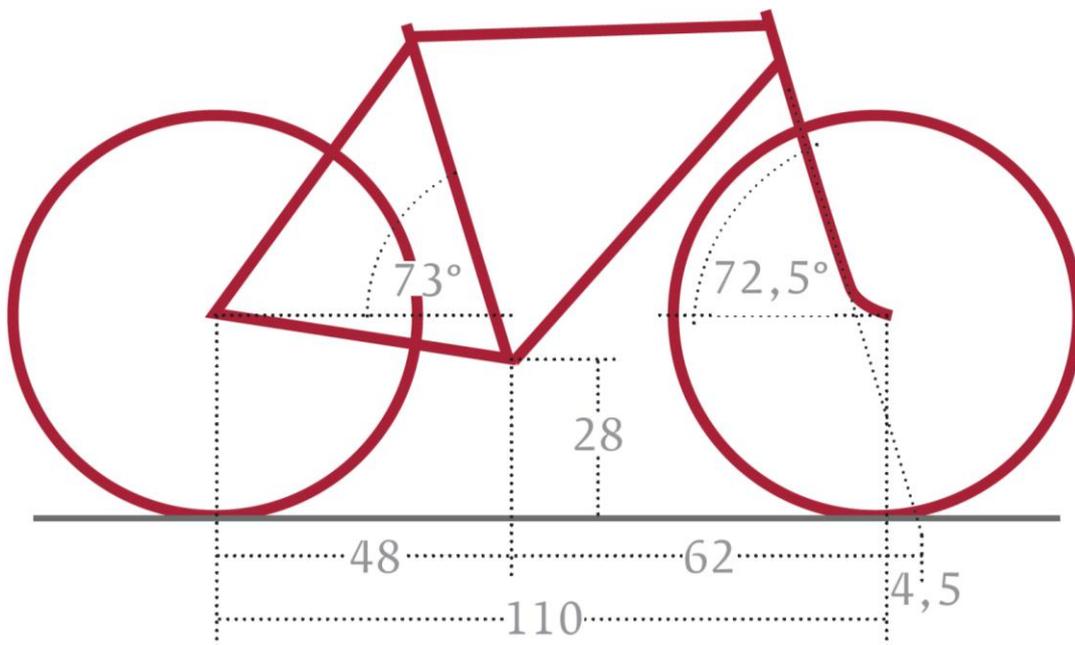


Abb. 19: Gängige Rahmengeometrie eines Reiserades [cm]
 (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013)

Das Reiserad ist dem Trekkingrad grundsätzlich sehr ähnlich, weicht aber durch manche Merkmale doch soweit ab, dass eine eigene Kategorie notwendig ist. Langlebige Komponenten, ein stabiler Rahmen, eine gute Lastverteilung sowie ein guter Geradeauslauf sind die maßgebenden Eigenschaften eines Reiserades. Diese Eigenschaften erhält es, im Unterschied zum Trekkingrad, durch einen Stahlrahmen, einen längeren Radstand und eine angepasste Lenkergeometrie. Zusätzlich ist der Stahlrahmen im Falle einer Beschädigung einfacher zu schweißen. Üblich sind Ketten- als auch Nabenschaltungen sowie V-Bremsen. Auf eine Federung wird in der Regel verzichtet, da dadurch weniger Gepäck mitgeführt werden kann.

2.2.1.4 Sporträder

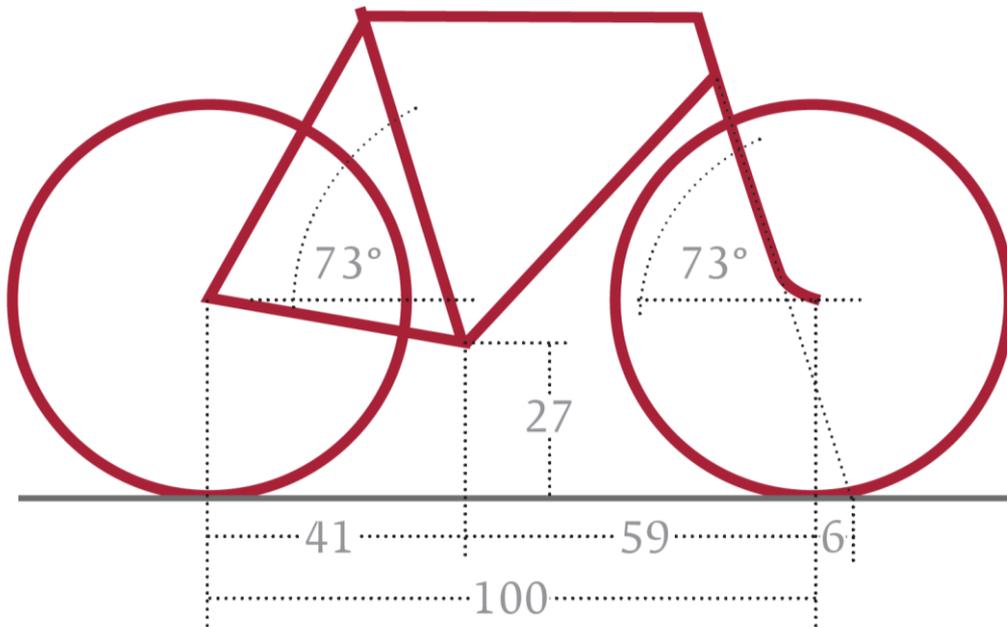


Abb. 20: Gängige Rahmengenometrie eines Rennrades [cm]
 (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013)

Sporträder sind grundsätzlich in Rennräder und Mountainbikes zu unterteilen. Rennräder zeichnen sich durch ihr geringes Eigengewicht und einen kurzen Radstand aus. Durch den kurzen Radstand wird die Antriebskraft möglichst verlustarm auf das Hinterrad übertragen. Die Sitzposition ist aufgrund des hohen Luftwiderstands bei höheren Geschwindigkeiten sehr flach, wodurch auch ein Rennlenker unabdingbar ist. Unter anderem sind Kettenschaltungen, Seitenzugbremsen und Systemlaufräder mit reduzierter Speichenzahl üblich - auf eine Federung wird verzichtet.

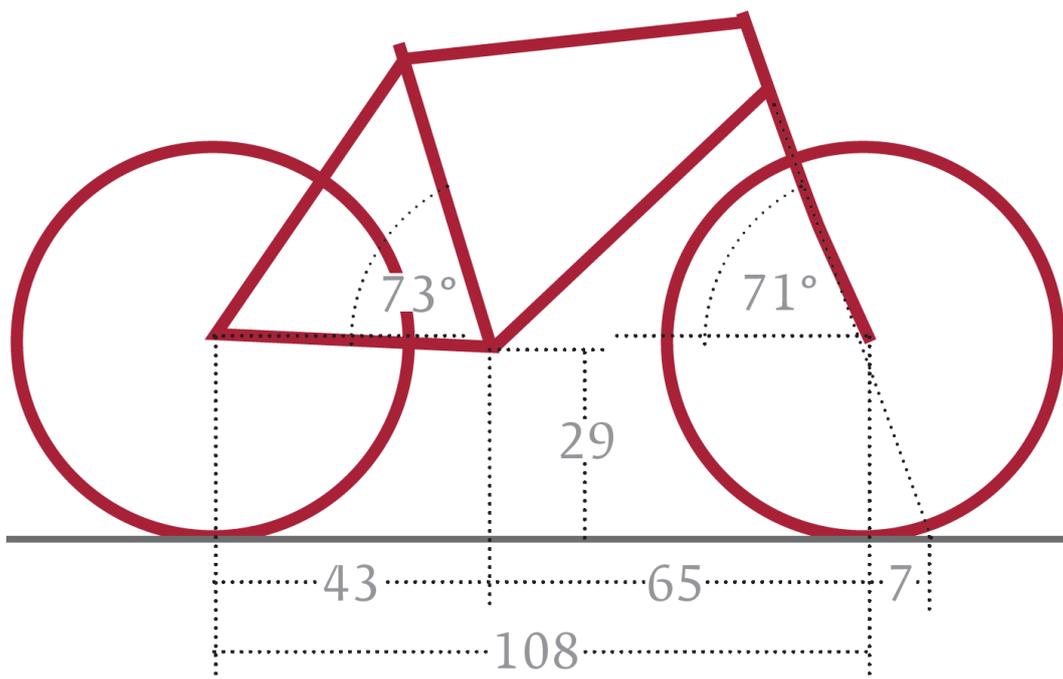


Abb. 21: Gängige Rahmengenometrie eines Mountainbikes [cm]
 (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013)

Mountainbikes sind, wie der Name schon sagt, für das Fahren im unwegsamen Gelände ausgelegt. Die typischen Merkmale sind breite grobstollige Reifen, ein höher liegendes Tretlager, ein breiter gerader Lenker sowie robuste Bremsen und Schaltungen. Die breiten grobstolligen Reifen verhelfen zu der notwendigen Griffigkeit, während das höher liegende Tretlager genügend Freiraum für die Kraftübertragung bei Unebenheiten aller Art schafft. Der breite Lenker bietet einen längeren Hebelarm und erlaubt somit sicheres Lenken bei schwierigen Verhältnissen. Eine Gabelfederung zählt bei Mountainbikes zum Standard, während eine Rahmenfederung weiterhin optional bleibt. Die durch eine 27-Gang Schaltung angetriebenen Reifen sind 26 Zoll groß. Gebremst werden diese in der Regel mit V-Bremsen, hydraulischen Bremsen oder Scheibenbremsen.

2.2.2 Das Laufrad

Eines der wesentlichen Elemente des Rades ist natürlich das Laufrad selbst. Dessen Eigenschaften haben einen großen Einfluss auf die Fahreigenschaften und den Fahrkomfort. Dabei spielen der Aufbau (Nabe, Speichen, Felgen und Reifen), die Geometrie (Umfang, Breite, Wandhöhe, usw.), die Gummimischung, das Profil und der Reifendruck eine entscheidende Rolle.

2.2.2.1 Die Nabe

Die Nabe ist sozusagen das Herzstück des Laufrades. Sie ist über ihren Flansch an den Speichen aufgehängt und bildet damit die Drehachse. Somit ist die Nabe das Bindeglied zwischen Rahmen und Laufrad. Generell wird zwischen Vorder- und Hinterradnabe unterschieden, da diese aufgrund der unterschiedlich hohen Belastung entsprechend unterschiedliche Durchmesser aufweisen. Am Hinterrad muss zusätzlich zum Eigengewicht die Antriebskraft aufgenommen werden, wobei beim Vorderrad unter Verwendung von Federgabel noch ein zusätzliches Biegemoment, welches aus einer Schiefstellung bei unterschiedlich verformten Federn resultiert, aufgenommen werden muss. Daher hat die Hinterradnabe üblicherweise einen höheren Durchmesser als die Vorderradnabe.

2.2.2.2 Die Speichen

Die Art der Speiche (Drahtspeichenrad, Druckspeichenrad oder Scheibenrad) spielt im Grunde nur im Bereich des professionellen Radsports eine Rolle. Im üblichen Straßenverkehr hat sich das Drahtspeichenrad aufgrund der leichten und einfachen Bauweise zum Standard entwickelt. Die Speichen haben die Aufgabe das Laufrad in Form zu halten und sind daher vorgespannt. Während der Fahrt sind die Speichen, die sich über der Nabe befinden, durch statische (Eigengewicht des Rades, Fahrers/Fahrerin und Gepäcks) und dynamische Lasten (Stöße während der Fahrt z.B. durch das Befahren einer Bordsteinkante) auf Zug belastet, während die Speichen unter der Nabe auf Druck belastet sind. Wären die Speichen nicht vorgespannt, würden die Speichen unter der Nabe aufgrund der Druckbelastung ausfallen, wodurch sich das Laufrad verformen würde. Durch die richtige

Vorspannung sind die untenliegenden Speichen trotzdem auf Zug belastet und halten somit das Rad in Form.

2.2.2.3 Die Felge

Am anderen Ende hängt die Speiche an der Felge, welche auch die Laufradgröße vorgibt. Standardmäßig bestehen diese heutzutage aus Aluminium und werden in Schlauchreifen- und Drahtreifenfelgen unterschieden. Den Schlauchreifenfelgen liegt ein muldenförmiger Hohlkastenquerschnitt zugrunde, auf dem der Reifen mit eingenähtem Schlauch aufgeklebt wird. Durch das Erhöhen des Reifenluftdrucks presst sich selbiger noch fester an die Felge, wodurch die Betriebssicherheit gewährleistet ist. Drahtreifenfelgen weisen ebenfalls einen muldenförmigen Querschnitt auf, haben am Ende aber zusätzlich erhöhte Felgenflanken mit Haken (Felgenhörner). Der zugehörige Drahtreifen hat einen Drahttring im Reifenwulst, welcher sich beim Erhöhen des Reifenluftdrucks in den Felgenhörnern verhakt, wodurch das Verrutschen des Reifens während der Fahrt verhindert wird. Neben den in **Abb. 22** dargestellten Profilen gibt es noch einige andere Profile, von deren Darstellung bzw. Beschreibung aufgrund der Relevanz für die weitere Arbeit abgesehen wird.

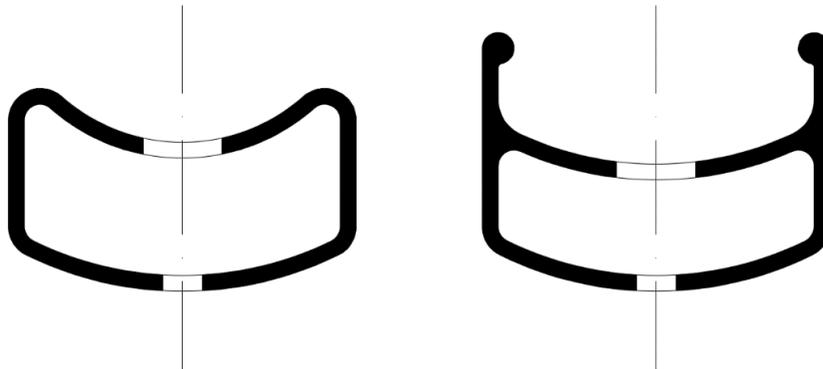


Abb. 22: Typische Felgenprofile von Schlauchreifenfelgen (links) und Drahtreifenfelgen (rechts) mit eingezeichneten Ausnehmungen zur Fixierung der Speichen

2.2.2.4 Reifen

Der Reifen selbst hat, wie oben bereits beschrieben, je nach Konstruktionsart verschiedene Aufbauten, wobei sich der Drahtreifen weitgehend zum Standardreifen entwickelt hat. Allerdings werden durchaus auch Schlauch- und Schlauchlosreifen verwendet. Im Grunde unterscheiden sich die drei Aufbauten nur im Luftdichtheitskonzept. Der Drahtreifen besteht aus drei Komponenten: dem Schlauch, der den Luftaustritt verhindert; der Karkasse, welche die einwirkenden Kräfte aufnimmt und dem Protektor, welcher aus abriebfestem Gummi besteht und das Profil bestimmt. Wie oben bereits erwähnt, befindet sich an den beiden Enden der Karkasse eine Wulst, in die üblicherweise ein Stahldraht eingearbeitet ist, welcher sich beim Erhöhen des Luftdrucks im Schlauch in den Felgenhörnern verhakt. Bei Schlauchreifen wird der Schlauch in die Karkasse eingnäht, wodurch eine

Einheit entsteht. Dadurch entfällt die Wulst, und der Reifen wird nur in die Mulde geklebt. Bei Schlauchlosreifen wird auf den Schlauch komplett verzichtet und die Karkasse bildet zusammen mit der Felge ein luftdichtes System. Dafür sind allerdings noch eine zusätzliche Butyl-Auflage im Inneren des Reifens sowie speziell dafür ausgelegte Felgen notwendig. Wie in **Abb. 22** eingezeichnet, werden die Speichen auf der Oberseite der Mulde fixiert; dies erfordert ein entsprechendes Abdichten dieser Stellen. Bei manchen Herstellern ist die Mulde durchgängig und die Speichen werden nur am unteren Teil des Hohlkastens befestigt.

2.2.2.5 Reifenprofil

Prinzipiell verhält es sich so, dass bei glattem bzw. hartem Untergrund glattere Profile in Kombination mit schmalen Reifen verwendet werden, wobei die Bodenhaftung vorwiegend durch die Haftreibung entsteht. Bei weichem, losem Untergrund sind breitere Reifen mit größerem Profil effizienter, da die Bodenhaftung in diesem Fall, neben der Haftreibung, auch über den Formschluss erzielt wird. Auch die Gummimischung spielt dabei eine wesentliche Rolle. Ist der Gummi weicher, kann sich der Reifen besser an die Unebenheiten anpassen und so auch in kleine Bodenritzen eindringen, wodurch die Bodenhaftung erhöht wird. Härtere Gummimischungen sind bei groben Profilen effizienter, da sich die Stollen tiefer in den Untergrund eindrücken können und sich somit der Formschluss verbessert; dies führt zu einer erhöhten Bodenhaftung. Manche Hersteller gehen hier auch den Mittelweg, indem der Reifen in Schichten produziert wird: Bei den außenliegenden Schichten wird weiches Gummi verwendet, welches nach innen gehend immer härter wird. Dadurch bleibt der Formschluss bei weichem Boden erhalten, während bei glattem, harten Untergrund sich die Stollen leichter verbiegen können; dies führt so zu einem besseren Abrollverhalten.



Abb. 23: Gängige Reifenprofile von links nach rechts:
Slick Reifen, Straßenreifen, Schulterstollenreifen, Tourenreifen, Geländereifen, Ballonreifen und Spikereifen
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Ralf Bohle GmbH, 2016)

2.2.3 Widerstände

Während der Fahrt ist der/die Fahrer/Fahrerin neben dem inneren Reibungswiderstand der sich bewegenden Teile und dem Trägheitswiderstand hauptsächlich mit folgenden drei weiteren Widerständen konfrontiert: dem Roll-, Luft- und Steigungswiderstand. Die nun folgenden

Erläuterungen zu den Widerständen basieren, wenn nicht anders kenntlich gemacht, auf Barzel, et al., 1. Auflage 2008 und Gressmann, 11. Auflage 2010.

2.2.3.1 Rollreibung | Rollwiderstand

Der Rollwiderstand wird auf zwei Anteile aufgeteilt – auf den Abroll- (~90 %) und den Walkwiderstand (~10 %). Bei Belastung flacht der Reifen im Bereich des Aufstandspunkts ab; es entsteht eine Aufstandsfläche A_f [cm²] die, unter Annahme einer ähnlichen Elastizität aller gängigen Reifen(-wände), abhängig von der Aufstandskraft F_A [N] und dem Reifendruck p [N/mm²] ermittelt werden kann:

$$A = \frac{F_A}{p} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1)$$

Vor der Aufstandsfläche entsteht während der Fahrt, aufgrund der ungleichmäßigen Druckverhältnisse im Reifen, eine kleine Wulst, worüber das Laufrad ständig hinwegrollen muss. Im in Fahrtrichtung vorderen Bereich der Aufstandsfläche ist der Reifendruck höher als im hinteren Bereich, wodurch der theoretische Aufstandspunkt um den Abstand f [mm] nach vorne verlagert wird. In dem neuen Aufstandspunkt greift die Aufstandskraft F_A [N] an und verursacht durch den Abstand f ein Bremsmoment. Um nun den Abrollwiderstand zu ermitteln, ist es wichtig zwischen Vorder- und Hinterrad zu unterscheiden. Handelt es sich um das Hinterrad, welches im Gegensatz zum Vorderrad angetrieben ist, wirkt die Abrollwiderstandskraft in Fahrtrichtung, während beim Vorderrad die Abrollwiderstandskraft gegen die Fahrtrichtung wirkt (siehe **Abb. 24**).

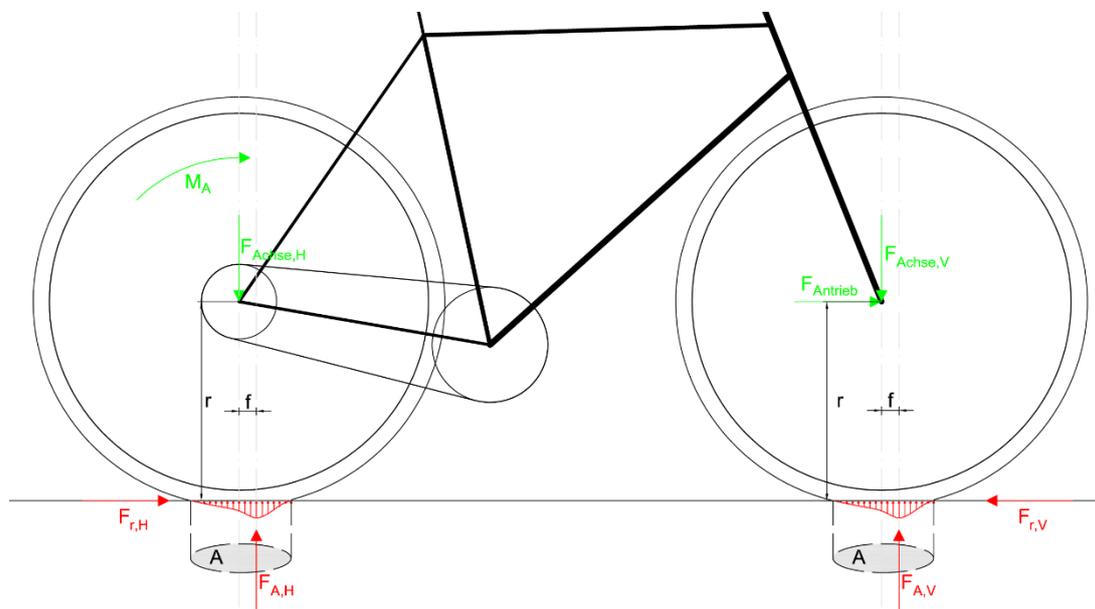


Abb. 24: Schematisches Fahrrad mit einwirkenden Kräften (grün), Auflager- und Abrollwiderstandskräften (rot)
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)

Betrachtet man nun jedes Rad für sich, bildet zuerst das Gleichgewicht der Kräfte in vertikaler Richtung und im Anschluss das Gleichgewicht der Momente um die jeweilige Radachse, erhält man die Abrollwiderstandskräfte zu:

$$F_{r,H} = \frac{M_A}{r} - F_{Achse,H} \cdot \frac{f}{r} [N] \quad (2)$$

$$F_{r,V} = F_{Achse,V} \cdot \frac{f}{r} [N] \quad (3)$$

mit

$$k_R = \frac{f}{r} [-] \quad (4)$$

Der Quotient $\frac{f}{r} [-]$ wird auch „Abrollreibungskoeffizient“ $k_R [-]$ genannt, während der Quotient $\frac{M_A}{r} [N]$ die „verlustfreie Antriebskraft“ $F_{ideal} [N]$ darstellt. In weiterer Folge kann die gesamte Abrollwiderstandskraft $F_{r,ges} [N]$ ermittelt werden:

$$F_{r,ges} = F_{Achse,ges} \cdot k_R = m_{ges} \cdot g \cdot k_R [N] \quad (5)$$

Wird Formel (5) nach dem Abrollreibungskoeffizienten umgeformt, lässt sich sofort erkennen, dass dieser bei steigendem Systemgewicht kleiner wird. Außerdem ist klar, dass der Abrollreibungskoeffizient aus Formel (4) vom Laufraddurchmesser abhängig ist und sich bei größerem Laufraddurchmesser ebenfalls verkleinert. Allerdings muss man hier auch beachten, dass der Abstand f ebenfalls vom Laufraddurchmesser abhängig ist, denn:

$$f \approx \sqrt{r} [mm] \quad (6)$$

Dadurch wird der Vorteil eines größeren Laufrades etwas reduziert, aber nicht gänzlich aufgehoben. Der Walkwiderstand entsteht durch die permanente Verformung des Reifens im Aufstandspunkt und beträgt ca. 10 % des Abrollwiderstands, womit der gesamte Rollwiderstand über

$$F_R = F_{r,ges} \cdot 1,1 [N] \quad (7)$$

ermittelt werden kann. Mit der Erhöhung des Reifendrucks verringert sich die Aufstandsfläche und somit der Walkwiderstand wie auch der Abrollwiderstands-Koeffizient. Weiters ist bei Reifen mit größeren Profilen der Walkwiderstand höher als bei Reifen mit glatten Profilen, da sich größere Profile während dem Abrollen stärker verformen müssen. Auch die Reifenbreite hat einen Einfluss auf den Walkwiderstand, da sich die Aufstandsfläche entsprechend anpasst. Während diese bei dünneren Reifen lang und schmal ist, ist sie bei breiten Reifen breiter und kürzer. Somit ist bei breiten Reifen auch der Abstand f entsprechend kürzer als bei schmalen Reifen. Um nun noch den Zusammenhang mit der Geschwindigkeit herzustellen, muss auf den Begriff der Leistung zurückgegriffen werden: Die erforderliche Leistung um den Rollwiderstand zu überwinden berechnet sich somit zu

$$P_R = F_R \cdot v [W] \quad (8)$$

Durch diesen Zusammenhang ergibt sich der lineare Verlauf der erforderlichen Leistung zur Überwindung des Rollreibungswiderstandes in **Abb. 26** auf S. 33.

2.2.3.2 Haft- und Gleitreibung

Zusätzlich zur Rollreibung spielen auch die Haft- und Gleitreibung eine entscheidende Rolle. Die Haftreibung bzw. der Haftwiderstand wirken solange der, auf einen ruhenden Körper einwirkenden, Kraft entgegen, bis sich selbiger Körper in Bewegung versetzt. Ab diesem Zeitpunkt wirkt die wesentlich kleinere Gleitreibung. Die Reibungszahlen μ_H und μ_G sind – im Falle eines Reifens – neben der Belastung zusätzlich von dem Reifendruck, der Temperatur, der Gummimischung und der Gleitgeschwindigkeit abhängig. Je höher die Temperatur, je höher die Geschwindigkeit und je härter die Gummimischung ist, umso kleiner ist die Reibungszahl. Außerdem darf an dieser Stelle der Schlupf nicht außer Acht gelassen werden; sind doch die Reibungszahlen ebenfalls von diesem abhängig. Um die Reibung zu aktivieren und somit die Antriebskraft bzw. Bremskraft auf den Untergrund zu übertragen, muss das Rad etwas durchrutschen bzw. blockieren. Beim Antriebsschlupf s_a ist die Umfangsgeschwindigkeit v_u eines Punktes auf dem äußersten Rand des Laufrades größer als die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit v :

$$s_a = \frac{v_u - v}{v_u} \cdot 100 [\%] \quad (9)$$

Umgekehrt wirkt beim Bremsen der Bremsschlupf s_b : die Umfangsgeschwindigkeit eines Punktes auf dem äußersten Rand des Laufrades ist kleiner als die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit v , wodurch sich folgende Definition ergibt:

$$s_b = \frac{v - v_u}{v} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

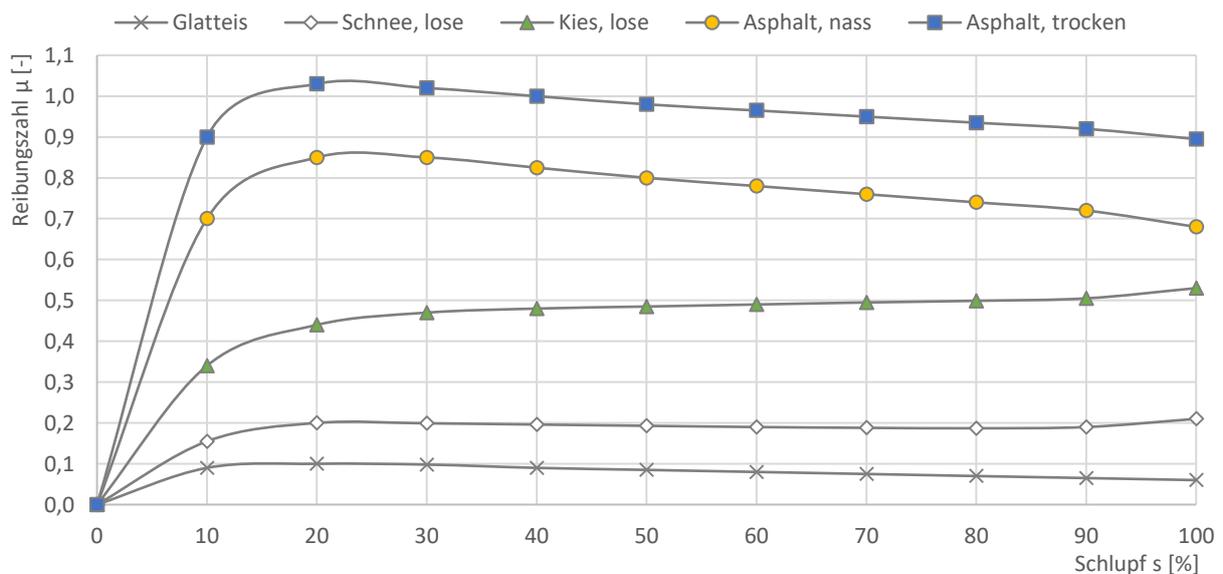


Abb. 25: Zusammenhang zwischen der Reibungszahl μ und dem Schlupf s
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)

Aus **Abb. 25** kann entnommen werden, dass die Reibungszahl bei einem Schlupf von ca. 20 % auf Glatteis, trockenem sowie nassem Asphalt ein Maximum erreicht. Bei losem Kies und Schnee wird das

Maximum bei 100 % Schlupf erreicht, dies kann auf eine Anhäufung von losem Material vor dem Rad zurückgeführt werden. Auch die Trockenheit der Fahrbahn hat einen Einfluss auf die Haft- bzw. Gleitreibung: Bei nasser Fahrbahn ist die Reibungszahl um bis zu 25 % niedriger als auf trockener Fahrbahn.

2.2.3.3 Reibungswiderstand sich bewegender Teile | Innerer Reibungswiderstand

Dieser Widerstand kann über den Wirkungsgrad ermittelt werden. Der Wirkungsgrad η [-] des gesamten Systems „Fahrrad“ beträgt üblicherweise $0,96^{14}$ was einem Leistungsverlust bzw. Widerstand von 4 % entspricht. Führt nun ein/eine RadfahrerIn mit einer bestimmten Dauerleistung P_D lässt sich die benötigte Leistung zur Überwindung der Reibung von sich bewegenden Teilen zu

$$P_{Reib} = P_D \cdot (1 - \eta) [W] \quad (11)$$

berechnen. Über die Leistung und die gefahrene Geschwindigkeit v kann auch die Kraft ermittelt werden, die erforderlich ist, um den inneren Reibungswiderstand zu bewältigen:

$$F_{Reib} = \frac{P_D}{v} [N] \quad (12)$$

2.2.3.4 Luftwiderstand

Ab einer Geschwindigkeit von ca. 15 - 18 km/h übersteigt der Luftwiderstand den Rollwiderstand und wächst quadratisch an, wodurch dieser maßgebend wird. Führt die FahrerIn gegen den Wind, muss die Windgeschwindigkeit ebenfalls mitberücksichtigt werden. Die Luftwiderstandskraft F_L berechnet sich in Abhängigkeit vom Luftwiderstandsbeiwert c_w (siehe **Tab. 2**), der Luftdichte ρ_L , der Geschwindigkeit des Fahrrads v_F , der Windgeschwindigkeit v_W (Gegenwind mit negativen Vorzeichen) und der Stirnfläche des Fahrers bzw. Fahrrads A_{Stirn} zu

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho_L \cdot A_{Stirn} \cdot (v_F + v_W)^2 [N] \quad (13)$$

Die Leistung die zur Überwindung des Luftwiderstands erforderlich ist, ergibt sich weiter über:

$$P_L = F_L \cdot v_F [W] \quad (14)$$

Hierbei lässt sich erkennen warum der Luftwiderstand bei erhöhter Geschwindigkeit maßgebend wird: Bei der Berechnung der Leistung zur Überwindung des Luftwiderstands wirkt sich die Fahrgeschwindigkeit mit der dritten Potenz aus. Bei Gegenwind ist die Auswirkung des Luftwiderstandes sogar noch höher, da dieser zusätzlich über die zweite Potenz mitwirkt.

¹⁴ Gressmann, 11. Auflage 2010 S. 59

Tab. 2: Luftwiderstandsbeiwerte c_w von ausgewählten Fahrrädern (Quelle: Gressmann, 11. Auflage 2010)

Fahrzeug	c_w
BMX-Geländerad, Straßenrad (aufrechte Sitzposition)	1,10
Tourenrad (geneigte Sitzposition mit ausgestreckten Armen), Tandem	1,00
Rennrad (Rennposition)	0,88
Liegerad	0,77
Rad mit aerodynamischer Verkleidung	0,70

2.2.3.5 Beschleunigungswiderstand | Trägheit

Hier gilt es zwischen den translatorischen und dem rotatorischen Beschleunigungswiderstand zu unterscheiden. Der translatorische Beschleunigungswiderstand wirkt sich auf das gesamte System aus und ist jener Widerstand, den ein beschleunigter Körper aufgrund seiner Trägheit der Beschleunigung entgegensetzt. Dieser ist alleine von der Beschleunigung a [m/s^2] und der Gesamtmasse des Körpers m_{ges} [kg] abhängig:

$$F_T = m_{ges} \cdot a \text{ [N]} \quad (15)$$

Die dabei erbrachte Leistung berechnet sich über den bereits bekannten Zusammenhang:

$$P_T = F_T \cdot v \text{ [W]} \quad (16)$$

Der rotatorische Beschleunigungswiderstand ist der Widerstand, den ein in Rotation gebrachter Körper der Rotationbeschleunigung entgegensetzt. Folglich sind bei einem Fahrrad in erster Linie die Laufräder davon betroffen. Die Widerstandskraft wird über das Massenträgheitsmoment I [kgm^2], die Winkelbeschleunigung α [$1/s^2$] und den Radius des Laufrades berechnet:

$$F_{Rot} = \frac{M}{r} = \frac{I \cdot \alpha}{r} \text{ [N]} \quad (17)$$

Die erforderliche Leistung, die benötigt wird, um diesen Beschleunigungswiderstand zu überwinden, berechnet sich zu:

$$P_{rot} = M \cdot \omega \text{ [W]} \quad (18)$$

2.2.3.6 Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand vollendet die Liste der Widerstände und wird über die Masse des Fahrzeugs inkl. FahrerIn und sonstiger Lasten m [kg] als auch die Steigung s [-] berechnet:

$$F_{St} = m \cdot g \cdot s \text{ [N]} \quad (19)$$

Die zur Überwindung der Steigung benötigte Leistung ergibt sich wiederum aus:

$$P_{ST} = F_{ST} \cdot v \text{ [W]} \quad (20)$$

2.2.3.7 Gesamtwiderstand | Gesamtleistung

Die Gesamtwiderstandskraft bzw. die erforderliche Gesamtleistung zur Überwindung des Gesamtwiderstandes wird schlussendlich über die Summe der bisher angeführten Widerstandskräfte bzw. Leistungen berechnet:

$$F_{ges} = F_R + F_{Reib} + F_L + F_T + F_{Rot} + F_{St} [N] \quad (21)$$

$$P_{ges} = P_R + P_{Reib} + P_L + P_T + P_{Rot} + P_{St} [W] \quad (22)$$

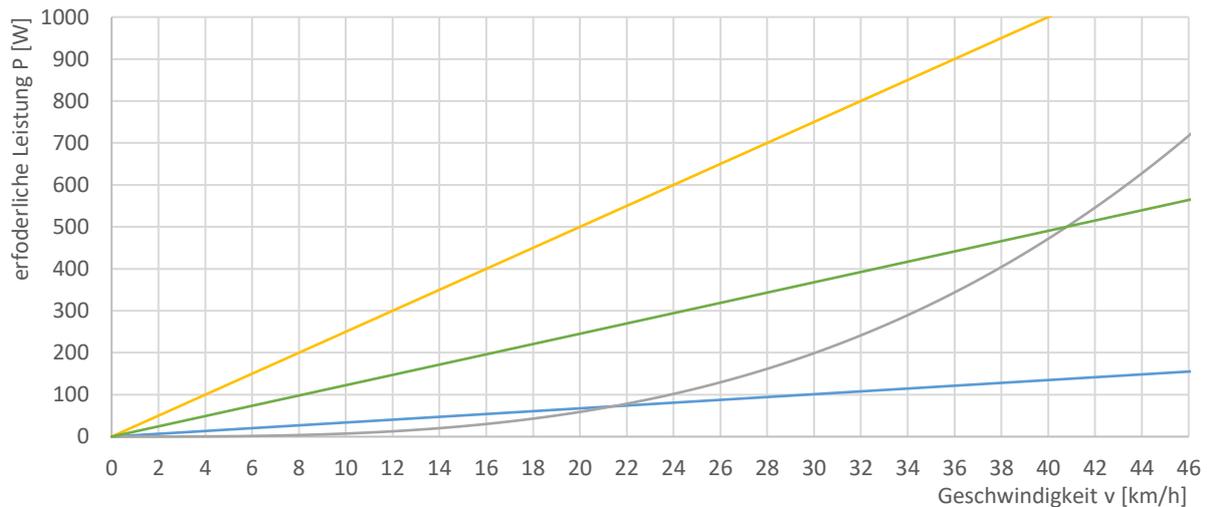


Abb. 26: Vergleich der Verläufe der erforderlichen Leistung zur Überwindung des Rollreibungswiderstandes (blau), des Luftwiderstandes (grau), des translatorischen Beschleunigungswiderstandes (gelb) sowie des Steigwiderstandes (grün) bei konstanter Beschleunigung (1 m/s^2), konstanter Steigung (5 %), Windstille und steigender Geschwindigkeit¹⁵

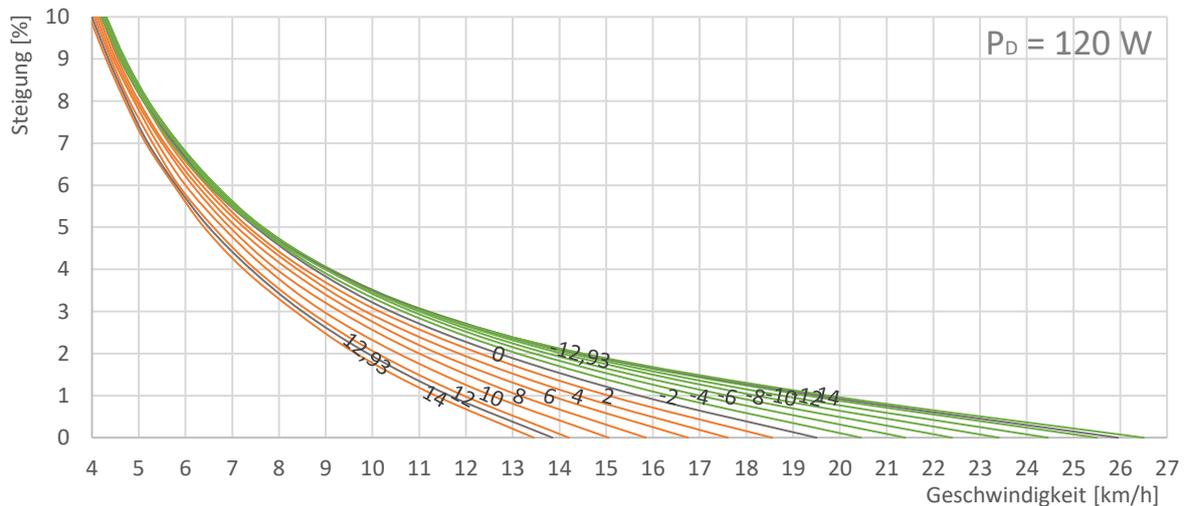


Abb. 27: Verläufe der maximal erreichbaren Fahrgeschwindigkeit mit einer Dauerleistung P_D von 120 W, durchschnittlichem Gesamtgewicht von 90kg und aufrechter Sitzposition unter Berücksichtigung der Steigung sowie der Gegen- (orange) und Rückenwindgeschwindigkeiten [km/h] (grün)¹⁶

¹⁵ Um die Übersichtlichkeit zu wahren werden die konstanten Verläufe der erforderlichen Leistungen für die Überwindung des inneren Reibungswiderstands sowie des rotatorischen Beschleunigungswiderstandes nicht abgebildet.

¹⁶ Der mit 12,93 km/h angesetzte Gegen- bzw. Rückenwind entspricht der langjährigen (1981-2010) mittleren Windgeschwindigkeit in Wien. (vgl. Stadt Wien, 2016)

In **Abb. 27** ist der Zusammenhang zwischen der Fahrgeschwindigkeit, der Steigung und dem Gegen- bzw. Rückenwind bei einer zugrunde gelegten Dauerleistung von 120 W abgebildet: z.B. darf die maximale Steigung bei einer angestrebten Fahrgeschwindigkeit von 14 km/h und einem Gegenwind von 6 km/h maximal $\sim 1\%$ betragen, um die von dem/der Radfahrer/Radfahrerin aufgebraachte Dauerleistung von 120 W nicht zu überschreiten.

2.2.4 Andere Effekte

In diesem Abschnitt werden alle anderen Effekte, wie etwa der gyroskopische Effekt, der Nachlauf und dessen Abhängigkeit von Lenkkopfwinkel und Versatz sowie andere Effekte, die einen wesentlichen Einfluss auf die Fahreigenschaften von Fahrrädern haben, beschrieben.

2.2.4.1 Gyroskopischer Effekt

Beim gyroskopischen Effekt handelt es sich um eine Eigenschaft rotierender Körper, die im Falle des Fahrrades stabilisierend in Erscheinung tritt. Eine genaue Beschreibung folgt unter Betrachtung des in **Abb. 28** grau dargestellten Vorderrads eines gewöhnlichen Fahrrades: Das Vorderrad kippt während der Fahrt aufgrund einer äußeren Einwirkung und dem daraus resultierenden Kippmoment M_1 mit der Geschwindigkeit v_x um die Kippachse B-B in eine der zwei möglichen Richtungen um (in diesem Beispiel in Fahrtrichtung nach Links). Aus der Umfangsgeschwindigkeit v_U des Laufrades und der Kippgeschwindigkeit v_x resultiert nun der Geschwindigkeitsvektor v_{res} . Aufgrund der Rotation richtet sich das Laufrad in weiter Folge selbstständig in Richtung des Geschwindigkeitsvektors v_{res} aus, wodurch sich das Laufrad auch automatisch um die Achse z-z dreht.

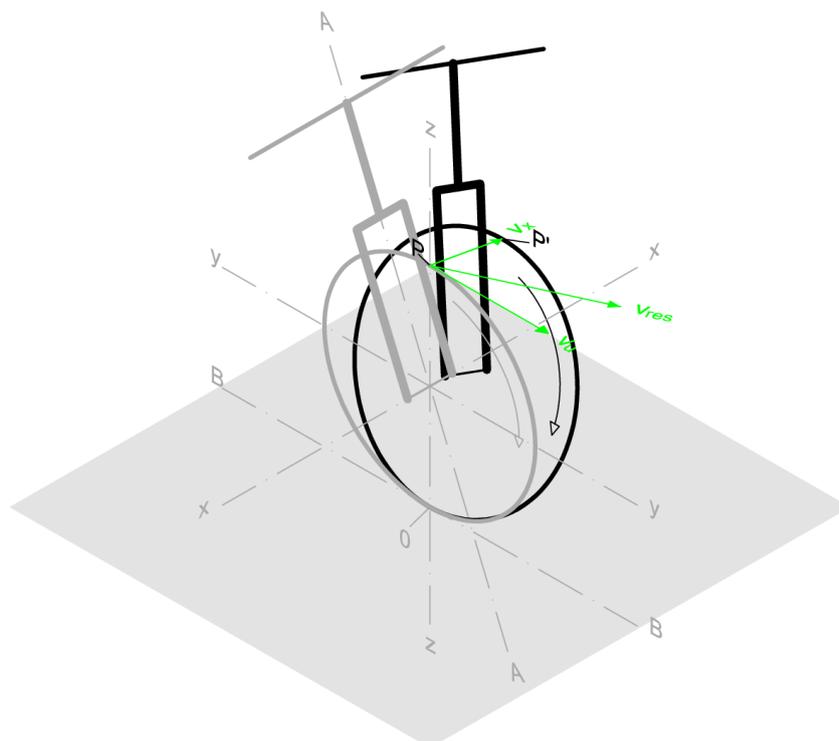


Abb. 28: Darstellung der Vorderradachsen und der wirkenden Geschwindigkeiten
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)

Durch die Drehung des Laufrades um die Achse z-z und die somit eingeleitete Linkskurve entstehen als Gegenreaktion Fliehkräfte, welche ein zweites Kippmoment M_2 hervorrufen. Dieses wirkt dem anfangs aufgebrauchten Kippmoment entgegen. Dadurch richtet sich das Fahrrad wieder selbstständig auf, das Laufrad schwenkt entsprechend der Neigung zurück und das Fahrrad fährt in die andere Richtung weiter. Würde der/die FahrerIn in dem Moment, in dem das Fahrrad wieder parallel zur Achse z-z steht, den Lenker und somit das Laufrad nicht wieder in Fahrtrichtung ausrichten, würde das Kippmoment M_2 ein Kippen nach rechts verursachen und das ganze Spiel würde von vorne losgehen. Je schneller sich das Fahrrad und somit das Laufrad bewegt bzw. dreht, umso höher muss die von außen einwirkende Kraft sein, um ein Kippen hervorzurufen. In anderen Worten: Je schneller das Fahrrad fährt umso stabiler ist der Geradeauslauf. Dieser Effekt kann gut beim freihändigen Fahren beobachtet werden, denn hierbei wird die Lenkbewegung nur durch die Verlagerung des Schwerpunkts verursacht. Je schneller sich das Fahrrad dabei bewegt, umso schwieriger wird das freihändige Lenken bzw. umso größer wird der Kurvenradius. Daraus resultieren zwei verschiedene Arten des Lenkens: Zuerst einlenken und dann kippen oder zuerst kippen und danach einlenken.

2.2.4.2 Gegenlenken

Möchte man nun während der Fahrt bspw. eine Linkskurve vollziehen, lenkt man intuitiv zuerst nach rechts um anschließend wieder sofort nach links zu lenken. Warum? Würde der/die FahrerIn einfach nur nach links lenken, würde die dabei auftretende Fliehkraft ein Kippmoment um die Achse B-B erzeugen, welches das Fahrrad mitsamt des/der Fahrers/Fahrerin nach rechts umfallen lassen würde. Lenkt der/die FahrerIn aber zuerst nach rechts, entsteht ein Kippmoment in die Gegenrichtung, wodurch das Fahrrad nach links kippt. In der nun geneigten Kurvenlage heben sich die Fliehkraft und die Gewichtskraft, welche sich aus der Masse des/der Fahrers/Fahrerin und der Erdbeschleunigung ergibt, auf und das Fahrrad kippt nicht um.

2.2.4.3 Nachlauf

In **Abb. 29** ist ein typisches Vorderrad mit dem Lenkkopfwinkel δ [°], dem Versatz v [mm] und dem Nachlauf n [mm] dargestellt. Alle drei Größen haben einen bedeutenden Einfluss auf den Nachlauf. Der Nachlauf ist der Abstand zwischen dem Aufstandspunkt O und dem Spurpunkt S (das ist der Durchstoßpunkt der Lenkachse A-A durch die Fahrbahn) des Vorderrades. Der Nachlauf ist positiv, wenn sich der Spurpunkt in Fahrtrichtung vor dem Aufstandspunkt O befindet.

Doch was bewirkt der Nachlauf? Der Nachlauf bewirkt in Kombination mit der Rückstellkraft $F_{\text{Rückstell}}$ das selbstständige Zurückdrehen des ausgelenkten Vorderrades (Achse $B' - B'$). Die Rückstellkraft wird durch die Abrollwiderstandskraft $F_{r,v}$, die beim Vorderrad gegen die Fahrtrichtung wirkt, hervorgerufen. Daraus resultiert ein Rückstellmoment $M_{\text{Rückstell}}$, welches das Vorderrad um die Lenkachse A-A, wie in **Abb. 30** ersichtlich, zurück in Fahrtrichtung dreht. Die Größe des Rückstellmoments hängt in erster Linie von der Größe des Nachlaufs ab: Je größer dieser Hebel ist, umso größer ist das Moment. Ein großer Nachlauf bewirkt eine stabilere

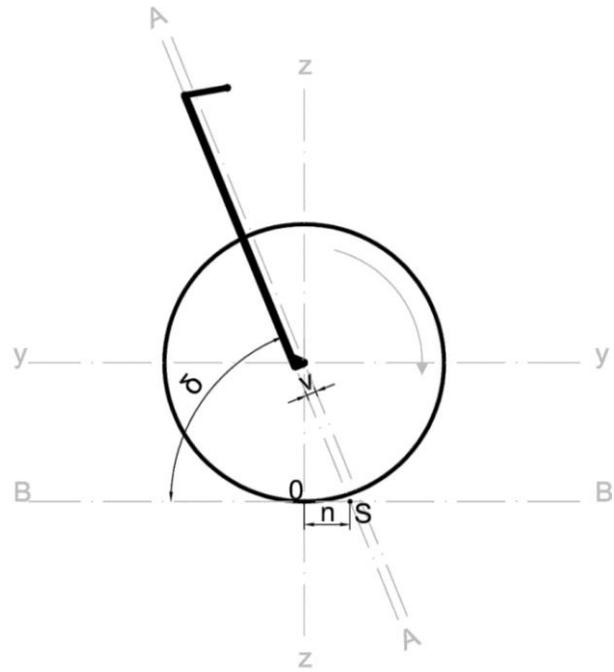


Abb. 29: Vorderrad mit Lenker, eingezeichnetem Achsen, Versatz v , Nachlauf n und Lenkkopfwinkel δ (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)

Geradeausfahrt; dieser Aspekt ist besonders beim Reiserad gewünscht. Allerdings kann ein großer Nachlauf auch nachteilig wirken, denn dadurch muss mehr Kraft zum Lenken eingesetzt werden. Daher hat sich die Bauweise mit Versatz v und geneigtem Lenkkopfwinkel δ eingebürgert. Beide verringern den Nachlauf und damit die notwendige Lenkforce; das Fahrrad wird wendiger.

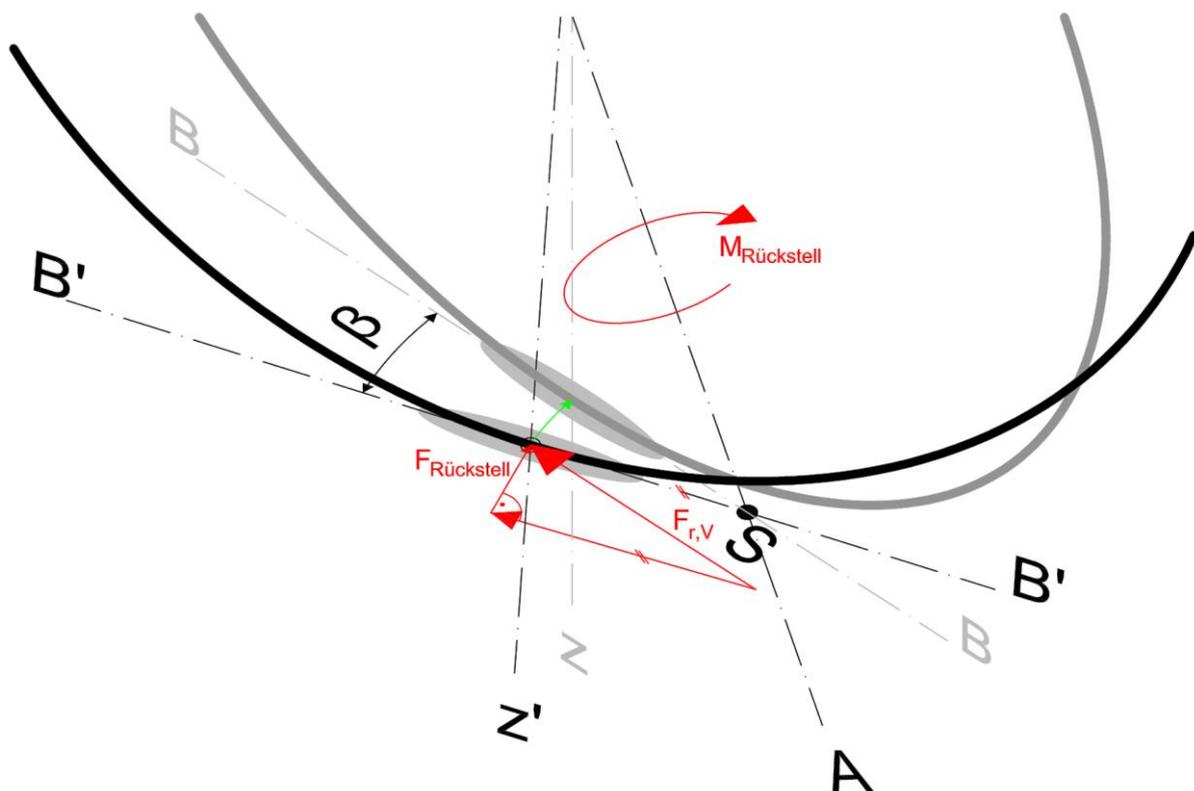


Abb. 30: Vorderrad in ursprünglicher (grau) sowie ausgelenkter (schwarz) Position mit den wirkenden Kräften (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)

2.2.4.4 Flattern | Pendeln

Das Schwingen des Fahrradrahmens aufgrund von Stößen und anderen Einwirkungen während der Fahrt wird als Flattern bezeichnet. Dies tritt erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten auf und ist somit mehr ein Problem im Bereich des professionellen Radsports. Insbesondere Schwingungen mit einer Frequenz nahe der Eigenfrequenz können aufgrund der Resonanz gefährlich werden. Daher kann das Flattern im Prinzip nur durch das Erhöhen der Eigenfrequenz verhindert werden, welche von der Steifigkeit, der Masse und der Massenverteilung der einzelnen Bestandteile abhängig ist.

Auch das Pendeln beruht auf aufgezwungenen Schwingungen, ist aber in der Entstehung weitaus komplizierter. Beim Pendeln schwingen die einzelnen Bestandteile des Fahrrads und der/die FahrerIn selbst. Diese gekoppelte Schwingung kann nur durch eine Geschwindigkeitsverringerung und dem langsamen loslassen des Lenkers unterbrochen werden; letzteres kann aber auch zu gefährlichen Situationen führen.

3 Umfrage

Die zwischen dem 26.08.2016 und 27.09.2016 durchgeführte Umfrage dient hauptsächlich der Beantwortung von **Frage 2**: Welche weiteren Wirkungsgrößen haben einen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen und wie hoch ist der Stellenwert dieser, im Vergleich zum Einfluss der Fahrbahnoberfläche? Zusätzlich wurde mit den so gewonnenen Daten die Literaturrecherche ergänzt, um den Vergleich mit aktuellen Zahlen zu ermöglichen. Außerdem wird der Wartungszustand bzw. die Art und Häufigkeit der Wartung, der sich in Benützung befindlichen Fahrräder untersucht, um somit Rückschlüsse auf die gemessenen Geschwindigkeiten zu ziehen. Die auf www.umfrageonline.com erstellte Umfrage wurde über einen Link auf sozialen Medien und Webseiten bzw. in Foren von verschiedenen fahrradnahen Organisationen verbreitet, sodass eine möglichst große Anzahl an befragten Personen erreicht wurde. Die Teilnahme erfolgte vollkommen freiwillig.

3.1 Aufbau

Den Anfang des Fragebogens bildete eine Einleitungsseite, welche die wesentlichsten Informationen zum Hintergrund der Umfrage beinhaltet. Anschließend folgten demographische Angaben zur befragten Person, wie etwa das Alter, der Wohnort, die Wohnortgröße, die Anzahl und Art der Fahrräder welche die Person besitzt. Somit ist die Vergleichbarkeit mit den in Abschnitt 2.1 dargestellten Informationen gegeben. Darauf folgten Fragen zu den Themengebieten Fahrradnutzung, Radverkehrsförderung, Fahrradtechnik und Fahrbahn. Bei der Formulierung und Auswahl der Fragen wurde ein besonderes Augenmerk auf die Relevanz, Verständlichkeit und den logischen Aufbau des Fragebogens gelegt. Generell gingen die Fragen von leichten zu immer komplexer werdenden Fragen über, wobei die Art der Antwortmöglichkeiten der einzelnen Fragen soweit möglich gleich bzw. ähnlich gewählt wurde, um ein schnelles und einfaches Ausfüllen zu ermöglichen. Der gesamte Fragebogen ist im Anhang beigelegt.

4 Standortwahl & relevante Einflüsse

Die für die Geschwindigkeitsmessungen gewählten Standorte mussten eine Vielzahl an Kriterien erfüllen, um die gewählte Geschwindigkeit der RadfahrerInnen nicht zu beeinflussen, sodass ein direkter Zusammenhang zwischen gewählter Geschwindigkeit und der Fahrbahnoberfläche deutlich gemacht wird. Die gewählten Streckenabschnitte sollten trocken, gerade, eben, mindestens 250 m¹⁷ lang, min. 2 m breit (Mindestbreite für Zweirichtungsradwege¹⁸), frei von FußgängerInnen, motorisierten VerkehrsteilnehmerInnen (Fahrradstraße, Ein- und Zweirichtungsradweg) und anderen Umgebungseinflüssen (wie etwa hineinhängende Vegetation und dgl.) sein und verschiedene Oberflächen aufweisen. Ebenso sollte vor und nach dem Streckenabschnitt möglichst keine größere Längsneigung vorhanden sein um ein Verfälschen der Geschwindigkeitsmessungen durch den daraus resultierenden Schwung zu vermeiden. Zusätzlich sollten sich innerhalb des oben angeführten 250m langen Bereichs keine unregelmäßigen Kreuzungen mit Querstraßen befinden, damit die RadfahrerInnen nicht vom Querverkehr beeinflusst werden. Obendrein sollte der Oberflächenzustand (Beschädigungen, Nässe, Verschmutzung durch Kies, Laub oder dgl.) ähnlich sein um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Somit kann, unter Vorbehalt der persönlichen Motivation der RadfahrerInnen (Radfahren aus sportlichen Gründen bzw. Radfahren um von A nach B zu kommen), davon ausgegangen werden, dass die Geschwindigkeit frei gewählt und nicht durch die Trassierung oder andere Einflüsse vorgegeben wird. RadfahrerInnen die durch ablenkende Tätigkeiten (wie z.B. telefonieren, navigieren oder dgl.) oder durch Einflüsse aus dem Verkehr (unachtsame kreuzende FußgängerInnen oder motorisierte VerkehrsteilnehmerInnen, RadfahrerInnen, die in Gruppen unterwegs sind, usw.) betroffen sind, wurden bei der Messung nicht berücksichtigt.

Bezüglich der Standorte für die Messungen, muss hier festgehalten werden, dass die Vielzahl der oben angeführten Kriterien das Bestimmen von geeigneten Messpunkten erheblich erschwert, weshalb die Kriterien wie folgt abgeändert werden:

- An einigen der schlussendlich gewählten Messpunkte verkehren neben RadfahrerInnen, FußgängerInnen vereinzelt auch motorisierte VerkehrsteilnehmerInnen. Wird bei der Geschwindigkeitsmessung darauf geachtet, dass der/die gemessene RadfahrerIn von anderen Verkehrsteilnehmern tatsächlich unbeeinflusst ist, kann dieser Umstand als nicht bedeutend eingestuft werden.
- Ähnlich wird bezüglich der Problematik mit Querstraßen vorgegangen: Ist es unvermeidbar, dass innerhalb der Messtrecke kreuzende Querstraßen vorkommen, muss während der

¹⁷ Bei einer gleichmäßig konstanten Beschleunigung von 1 m/s² wird eine Weglänge von ~125m benötigt um eine Geschwindigkeit von 16 km/h zu erreichen, welche ungefähr der durchschnittlichen Geschwindigkeit zufolge Kulhanek, 2016 entspricht

¹⁸ Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr, 2014

Messung auf den Ausgangspunkt des/der Radfahrers/Radfahrerin geachtet werden. Ist dieser/diese aus einer der kreuzenden Querstraßen gerade erst eingebogen, wird er/sie von der Messung ausgeschlossen. RadfahrerInnen die von kreuzenden VerkehrsteilnehmerInnen beeinflusst sind, wurden ebenso nicht berücksichtigt.

Mithilfe der Bikecitizens- und Strava-Heatmap in **Abb. 31**, kann für die Standortwahl eine erste grobe Abschätzung der RadfahrerInnen-Dichte auf den einzelnen Strecken erfolgen. Durch eine hohe Dichte kann der Messzeitraum kurzgehalten und trotzdem eine ausreichend große Anzahl an RadfahrerInnen bei annähernd gleichen Wetterbedingungen gemessen werden. In **Tab. 3** ist eine Übersicht der pro Standort eingehaltenen Kriterien gegeben.

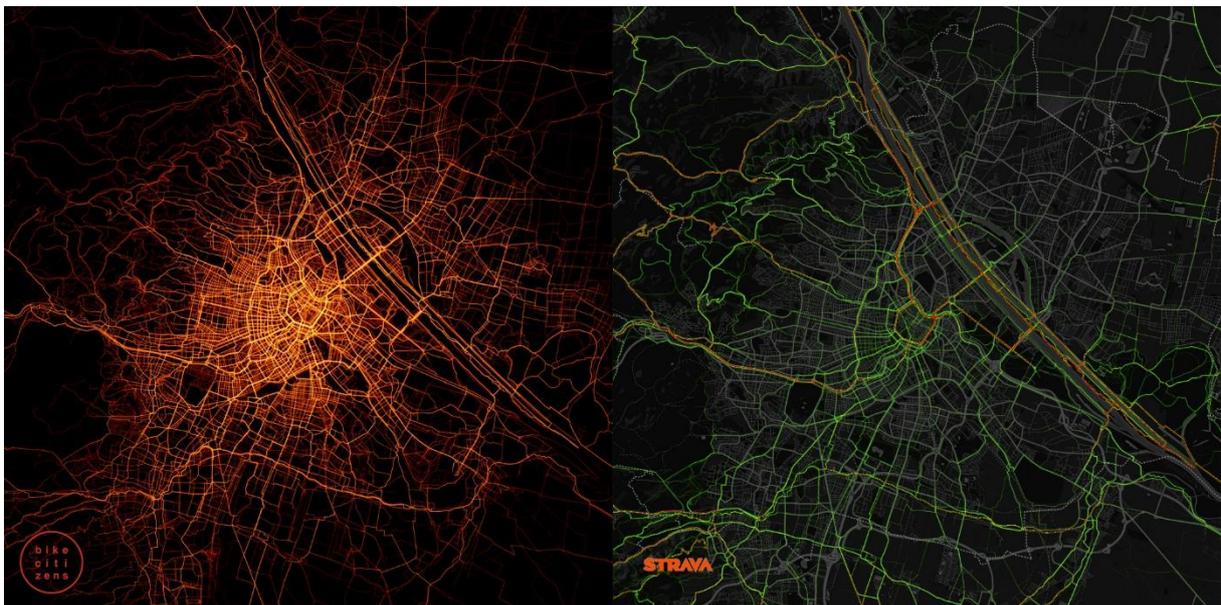


Abb. 31: Heatmap der Stadt Wien
(Quelle: Kulhanek, 2016; Strava Inc., 2016)

Tab. 3: Übersicht der eingehaltenen Kriterien aller Messpunkte bzw. Standorte

Kriterien	Argentinierstraße	Prater Hauptallee	Ringradweg	Wienflussradweg	Mariahilfer Straße	Donaukanalradweg	Jesuitenwiese
	Glatter Asphalt	Rauer Asphalt	Flächige Radwegmarkierung	Beton	Große, gleichmäßige Pflastersteine	Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine	Schotter
Trocken	X	X	X	X	X	X	X
Ebenheit der Fahrbahn	X	X	X	X	X	X	(X) ¹⁹
Gerade Streckenführung	X	X	X	X	X	X	X
Min. 250 m lang	X	X	X	X	X	X	X
Min. 2 m breit	X	X	X	X	X	X	X
Bauliche Trennung / Radweg	X	X	X	X		X	(X) ²⁰
Keine Längsneigung		X	X	X	X	X	X
Keine Querstraßen innerhalb des Streckenabschnitts			X	X		X	
Frei von	FußgängerInnen						
	motorisiertem Verkehr	X		X	X	X	X
Besonderheiten	Baustellenausfahrt				20 km/h Tempolimit		

¹⁹ Kleinere Unebenheiten liegen in der Natur des Schotterwegs.

²⁰ Dieser Weg ist offiziell kein Radweg, wird aber als solcher benutzt.

4.1 Glatter Asphalt



Abb. 32: Links: Messpunkt an der Argentinierstraße ($48^{\circ}11'42.3''N$ $16^{\circ}22'23.6''E$) mit eingezeichneten Radwegen (rot) (Quelle: Stadt Wien, 2016) | Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)

Der Messpunkt befindet sich am vielbefahrenen, baulich getrennt angeordneten, sowie 2 m breiten Radfahrstreifen in der Argentinierstraße, mittig zwischen Plößlgasse und Wohlebergasse. Hier werden die vorausgesetzten Kriterien nur zum größten Teil erfüllt, denn zwischen der Kreuzung Argentinierstraße/Plößlgasse und Argentinierstraße/Theresanumgasse, welche sich weiter südlich befindet und in **Abb. 32** nicht mehr eingezeichnet ist, besteht eine Höhendifferenz von 8,8 m. Umgerechnet ergibt das eine ~215 m lange Strecke mit einer Längsneigung von ~4 %. Um dies zu berücksichtigen wird in beiden Richtungen dieselbe Anzahl an RadfahrerInnen gemessen. Durch die bauliche Trennung des Radwegs vom Gehweg kommt es nur selten zu einer Beeinflussung des Radverkehrs durch FußgängerInnen. Erwähnenswert ist an dieser Stelle auch eine temporäre Baustellenausfahrt in direkter Nähe zum Messpunkt. Durch ein- und ausfahrende Lastwagen beeinflusste RadfahrerInnen werden nicht in der Messung berücksichtigt.

4.2 Rauer Asphalt



Abb. 33: Links: Messpunkt an der Prater Hauptallee ($48^{\circ}12'31.9''N$ $16^{\circ}24'28.8''E$) mit eingezeichneten Radwegen (*rot*) und Radrouten (*blau*) (Quelle: Stadt Wien, 2016) | Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)

Die ca. 10 m breite Prater Hauptallee ist einer von Wiens meist befahrenen Radwegen, der durchgehend asphaltiert ist und, unter Berücksichtigung der zuletzt genannten Abänderungen, alle oben genannten Kriterien erfüllt. Zusätzlich zu den RadfahrerInnen verkehren auf der Strecke auch FußgängerInnen und selten motorisierte VerkehrsteilnehmerInnen (Polizei und MitarbeiterInnen der Magistratsabteilung MA 42 - Die Wiener Stadtgärten). Bei der Wahl der genauen Messposition wurde darauf geachtet, dass ein ausreichend großer Abstand zu Querstraßen eingehalten wird, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Geschwindigkeit der vorbeifahrenden RadfahrerInnen nicht vom Querverkehr und abbiegenden bzw. einbiegenden Verkehr beeinträchtigt wird. Der Zustand der Fahrbahn kann durchaus als rau bezeichnet werden, entspricht ansonsten jedoch den Messanforderungen, da sie weder Risse, Verschmutzungen noch Unebenheiten aufweist.

4.3 Flächige Radwegmarkierung

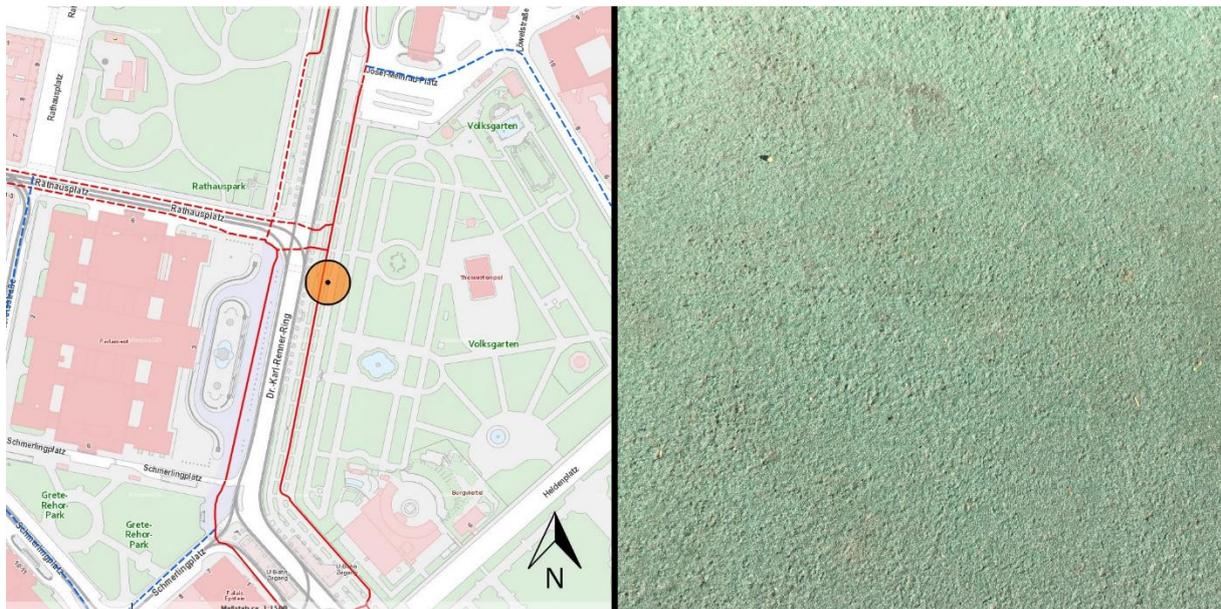


Abb. 34: Links: Messpunkt am Ringradweg ($48^{\circ}12'29.7''N$ $16^{\circ}21'37.1''E$) mit eingezeichneten Radwegen (rot) und Radrouten (blau) (Quelle: Stadt Wien, 2016) | Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)

Der Messpunkt, an dem die Geschwindigkeiten auf flächiger Fahrbahnmarkierung gemessen wurden, befindet sich am viel befahrenen Ringradweg auf Höhe des Parlaments. Die Fahrbahn befindet sich in einem allgemein als mäßig zu bezeichnenden Zustand, ist daher an vielen Stellen wiederinstandgesetzt worden, weshalb einige Längs- und Querfugen vorhanden sind. Ansonsten werden die oben genannten Bedingungen erfüllt. Da sich in direkter Nähe eine viel benutzte Straßenbahnhaltestelle und ein Schutzweg über den Dr.-Karl-Renner-Ring befindet, kam es hier des Öfteren zu einer Beeinflussung der RadfahrerInnen durch FußgängerInnen. In diesen Fällen wurden keine Messungen durchgeführt.

4.4 Beton



Abb. 35: Links: Messpunkt am Wienflussradweg ($48^{\circ}11'41.6''\text{N } 16^{\circ}15'50.5''\text{E}$) mit eingezeichneten Radwegen (*rot*) und Radrouten (*blau*) (Quelle: Stadt Wien, 2016) | Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)

Auch für diesen Messpunkt wurde eine von Wiens beliebtesten Radrouten gewählt: der Wienflussradweg. Die ca. 4 m breite Fahrbahn besteht aus ca. 6 m langen Betonplatten zwischen denen sich wenige Millimeter breite Fugen befinden. Dieser Messpunkt erfüllt ebenfalls die oben angeführten Voraussetzungen, wobei auch hier während der Messung auf die mögliche Beeinflussung der RadfahrerInnen durch PassantInnen geachtet werden musste. Erwähnenswert ist jedenfalls, dass im Vergleich zu den anderen Messpunkten an diesem Standort die RadfahrerInnen am wenigsten beeinflusst wurden.

4.5 Große, gleichmäßige Pflastersteine



Abb. 36: Links: Messpunkt an der Mariahilfer Straße ($48^{\circ}11'49.1''N$ $16^{\circ}20'42.7''E$) mit eingezeichneten Radwegen (rot) (Quelle: Stadt Wien, 2016) | Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)

Dieser Messpunkt befindet sich in der Begegnungszone der Mariahilfer Straße und erfüllt dementsprechend nicht alle oben angeführten Kriterien. Prinzipiell gilt in Begegnungszonen gemäß StVO eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 20 km/h, welche die RadfahrerInnen beeinflussen könnte. Das Ausmaß der Beeinflussung kann aber durchaus infrage gestellt werden, da (a) die Nutzung von Fahrradtachometern nicht verpflichtend ist und daher die meisten selbst nicht genau wissen, ob die Begrenzung überschritten wurde oder nicht und (b) zu den, für diese Messung, gewählten Uhrzeiten kaum FußgängerInnen, welche dieses Tempolimit rechtfertigen, gegenwärtig waren. Wegen den FußgeherInnen und zusätzlich wegen dem MIV (vor allem der Lieferverkehr) wurde, wie oben bereits angesprochen, die Uhrzeit bewusst möglichst früh (07:00 - 09:00 Uhr) gewählt, um die Beeinflussung der RadfahrerInnen zu minimieren. Die Fahrbahn befindet sich aufgrund des geringen Alters (Bauzeit: 2014 – 2015) in einem sehr guten Zustand und ist daher ideal für Messungen. Die einzelnen Pflastersteine sind 29,5 cm lang, 19,5 cm breit und sind von 0,5 cm breiten Fugen umgeben (Quelle: eigene Messung).

4.7 Schotter



Abb. 38: Links: Messpunkt an der Jesuitenwiese ($48^{\circ}12'19.6''N$ $16^{\circ}24'14.3''E$) mit eingezeichneten Radwegen (rot) (Quelle: Stadt Wien, 2016) | Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)

Auf der Jesuitenwiese direkt neben zwei sich kreuzenden Schotterwegen befindet sich der letzte Messpunkt. Genaugenommen sind die zwei Wege im Wiener Stadtplan, wie aus **Abb. 38** ersichtlich, nicht als Radweg gekennzeichnet, werden aber dennoch als solche verwendet. Die Hauptverkehrsrichtung verläuft auf dem ca. 260 m langen Stück von der Rotundenallee im Nordosten bis zur Friedensgasse im Südwesten. Das Verkehrsaufkommen auf der kreuzenden Strecke ist durch eine Radfahrverbotszone im Bereich eines Hundeauslaufplatzes, der sich noch weiter östlich befindet und in **Abb. 38** nicht mehr abgebildet ist, vergleichsweise gering. Die oben genannten Kriterien werden im Wesentlichen erfüllt, allerdings ist auch hier abhängig von der Uhrzeit mit geringem bis starkem Fußgängerverkehr zu rechnen, den es zu berücksichtigen gilt. Die etwa 3 m breite Fahrbahn befindet sich im guten Zustand: Sie ist trocken, weist keine Schlaglöcher auf und ist überwiegend eben. Während der Messungen stellte sich heraus, dass an diesem Messpunkt viele Personen mit einer Geschwindigkeit unter dem Messbereich der verwendeten Radarpistole vorbeifuhren. Konkret waren es in dem Zeitraum, in dem die Messungen stattgefunden haben, in etwa gleich viele, wie Personen mit messbaren Geschwindigkeiten. Dieser Umstand wurde in der Auswertung des Messergebnisses entsprechend berücksichtigt.

4.8 Gewachsener Boden

Da diese Art von Fahrbahn im städtischen Umfeld eine eher untergeordnete Rolle spielt und auch keine vielbefahrene Strecke, welche die obigen Punkte erfüllt, gefunden wurde, wurden auf diesem Untergrund keine Messungen durchgeführt.

4.9 „TerraWay“- bzw. „Stabilizer“-Belag²¹

Zurzeit gibt es im Großraum Wien noch keine Radfahranlagen mit diesem Belag, die den obigen Punkten genügen würden. Zwar sind einige Abschnitte im Bereich der neuen Wirtschaftsuniversität Wien mit einem solchen Belag versehen, allerdings befinden sich diese Abschnitte zum größten Teil innerhalb einer Fußgängerzone, weshalb auch hier keine Messungen erfolgen konnten.

²¹ Bei diesen Belägen handelt es sich um wasserdurchlässige, atmungsaktive Edelsplitt-Beläge, die durch einen speziellen Binder gebunden sind (vgl. Steinbauer Development GmbH, 2016, stabilizer 2000 GmbH, 2016).

5 Versuchsaufbau & Datenerhebung

In diesem Abschnitt werden zuerst die Messgeräte vorgestellt und im Anschluss die unterschiedlichen Messverfahren, die zur Beantwortung von **Frage 1** (Welchen Einfluss hat die Fahrbahnoberfläche auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen?) durchgeführt wurden. Dabei gilt es zwischen:

- **Versuchsmessungen:** Messungen der Geschwindigkeit von RadfahrerInnen auf einer der Oberflächen zur Überprüfung von Annahmen
- **Geschwindigkeitsmessungen:** Verbleibende Geschwindigkeitsmessungen, deren Ablauf bzw. Aufbau auf Basis der Versuchsmessungen definiert wurde
- **und Rauheitsmessungen:** Messung der Beschleunigungen während dem Befahren der verschiedenen Fahrbahnoberflächen

zu unterscheiden.

5.1 Messgeräte

Folgende Messgeräte wurden verwendet:

- Geschwindigkeit: Stationäre Radarpistole des Typs Stalker II mit einer Genauigkeit von $+2 / -3$ km/h bei einem messbaren Geschwindigkeitsbereich von 8 - 322 km/h (5 - 200 Mph)
- Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur: Anemometer mit einem Messbereich von 0 - 30 m/s bzw. $-10 - 45$ °C bei einer Messgenauigkeit von $\pm 1,5$ m/s bzw. ± 2 °C
- Beschleunigung: Beschleunigungssensor MPU6516 der Marke Invensense eines LG D-821 Mobiltelefons (auch als Nexus 5 bekannt)

Während den Geschwindigkeitsmessungen fiel auf, dass für einige RadfahrerInnen, die mit einer Geschwindigkeit von unter 18 - 19 km/h den Messpunkt passierten, auf der Radarpistole keine Geschwindigkeit angezeigt wurde. Da die Radarpistole für motorisierte Fahrzeuge und deren weitaus höhere Geschwindigkeiten ausgelegt ist, kann angenommen werden, dass die Ursache für dieses Verhalten wohl die, im Vergleich zu Kraftfahrzeugen (KFZ), stark verringerte und unregelmäßigere reflektierende Oberfläche von RadfahrerInnen ist. Somit lag die Untergrenze des praktischen Messbereichs bei 18 - 19 km/h. Befand sich allerdings ein/eine schnellerer/schnellere Radfahrer/Radfahrerin bzw. ein schnelleres KFZ in der Nähe, so war eine Messung des/der langsameren Radfahrers/Radfahrerin unabhängig der gefahrenen Richtung möglich. Da das aber oft nicht der Fall und somit die Messung dieser RadfahrerInnen nicht möglich war, ist die Durchschnittsgeschwindigkeit etwas höher als sie mit Berücksichtigung der langsameren RadfahrerInnen tatsächlich wäre. Eine nennenswerte Anzahl an nicht messbaren RadfahrerInnen wurde allerdings nur am Schotterweg vermerkt. Wie dies berücksichtigt wurde ist in Abschnitt 6.3 detailliert beschrieben.

Hier sei noch drauf hingewiesen, dass die Windgeschwindigkeit nur in die Berechnung der Leistung einfließt, weshalb die Messgenauigkeit des Anemometers nicht stark ins Gewicht fällt. Außerdem war es an den gewählten Standorten im Zeitraum der Messungen überwiegend windstill, sodass das Anemometer nur selten verwendet wurde.

5.2 Vergleichsmessungen

Da die Geschwindigkeitsmessungen (näheres dazu im folgenden Abschnitt) und die sonstigen dabei erhobenen Daten, den Kern dieser Arbeit bilden, ist eine sorgfältige Vorbereitung des Versuchsaufbaus unabdingbar. Im Vorfeld wurden auf dem in Abschnitt 4.6 beschriebenen Standort am Donaukanalradweg (kleine, ungleichmäßige Pflastersteine), aufgrund der Lage und des rauesten Untergrunds, eine Reihe von Vergleichsmessungen durchgeführt, welche klären sollten in welchem Ausmaß die gemessenen Geschwindigkeiten von der Tageszeit, dem Geschlecht und/oder dem Fahrradtyp abhängig sind.

Allgemein wird davon ausgegangen, dass Männer aufgrund ihrer Physiologie und der in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen Untersuchung („Männer fahren durchschnittlich schneller Fahrrad im Stadtverkehr als Frauen“²²) im Durchschnitt höhere Geschwindigkeiten erreichen als Frauen, sowie, dass Personen mit Rennrädern tendenziell schneller sind als Personen, die ein Fahrrad eines anderen Typs benutzen. Bezüglich der Tageszeit wird von der Annahme ausgegangen, dass zu den Stoßzeiten zwischen 07:00 und 10:00 Uhr (Weg zur Arbeit) sowie zwischen 16:00 und 19:00 Uhr (Heimweg) die Durchschnittsgeschwindigkeit höher ist als zwischen 10:00 und 16:00 Uhr. Daher wurden pro genannten Zeitabschnitt 250 Vergleichsmessungen durchgeführt, mit deren Hilfe gezeigt werden kann, ob die oben genannten Annahmen bestätigt werden können oder nicht. Während den insgesamt 750 Vergleichsmessungen wurden neben der Geschwindigkeit noch folgende Daten erfasst:

- das Geschlecht
- der Fahrradtyp
- die Sitzposition (wegen dem Einfluss auf den Luftwiderstand)
- die Windgeschwindigkeit inkl. ungefähre Windrichtung relativ zur Fahrbahn

Basierend auf den oben genannten Punkten, dem durchschnittlichen österreichischen Körpergewicht und der Körpergröße kann im weiteren Verlauf über die Formeln (1) bis (22) die durchschnittliche freiwillig aufgebrachte Leistung ermittelt werden. Mit den Ergebnissen der Auswertung (siehe Abschnitt 6.1) wurde die Vorgehensweise für die weiteren Messungen definiert.

²² Rau, et al., 1990

5.3 Geschwindigkeitsmessungen

Die restlichen Geschwindigkeitsmessungen wurden an Werktagen (Montag bis Freitag), unabhängig von der Uhrzeit, an den in Abschnitt 4 angeführten Standorten durchgeführt. Während den Messungen wurden neben der Geschwindigkeit, soweit möglich, noch die Fahrtrichtung, die Sitzposition, die Windgeschwindigkeit sowie die Windrichtung von 500 RadfahrerInnen pro Standort notiert. Da davon ausgegangen wird, dass auf glatten Oberflächen keine bemerkenswerten Unterschiede zwischen den Fahrradtypen auftreten, wurde nur an den Standorten Ringradweg (flächige Fahrbahnmarkierung) und Jesuitenwiese (Schotter), aufgrund der dort anzutreffenden sehr glatten und sehr rauen Oberfläche zusätzlich zu den zuvor angegebenen Daten auch noch der Fahrradtyp jedes/jeder gemessenen Radfahrers/Radfahrerin vermerkt. Somit ergaben sich insgesamt 3750 Messungen, welche im Anschluss digitalisiert und ausgewertet wurden. Um, möglichst langen und ununterbrochenen Sichtkontakt mit den zu messenden RadfahrerInnen zu garantieren, befanden sich die Messpunkte immer direkt neben der Fahrbahn.

5.4 Bestimmung der Oberflächenrauheit über die Beschleunigung

Wie anfangs in Abschnitt 1.2 erwähnt, wird von jeder untersuchten Fahrbahnoberfläche auch die Oberflächenrauheit über den Beschleunigungssensor (MPU6516 von InvenSense) eines handelsüblichen Mobiltelefons (LG D-821 auch bekannt als Nexus 5) bestimmt. Dabei wurde das Mobiltelefon über eine Halterung der Marke „Quad lock“ am vorderen Ende des Oberrohrs fixiert.



*Abb. 39: Nahaufnahme der Halterung „Quad Lock“ mit angebrachtem Mobiltelefon
(Quelle: eigene Aufnahme)*

Das Oberrohr ist in Relation zur Fahrbahnoberfläche um 10° geneigt, wodurch auch die y- und z-Achse des Mobiltelefons ebenfalls um diesen Winkel verdreht sind. Wie dieser Umstand berücksichtigt wird, ist im Abschnitt 6.4 detailliert beschrieben. Bei dem, während den Versuchsfahrten verwendeten, Fahrrad handelt es sich um das Modell „FUN SPIRIT“ der Marke KTM (siehe **Abb. 40**). Das Gesamtgewicht aus Fahrer (115 kg) und Fahrrad (15,5 kg) betrug 130,5 kg. Bei den Reifen handelt es

sich um „Tyrago“-Tourenreifen mit der Größe 42-622²³ von Schwalbe. Der Reifendruck wurde vor jeder Reihe von Versuchsfahrten überprüft und betrug 4,5 Bar; dieser Wert entspricht dem laut Hersteller maximal zulässigen Reifendruck.



Abb. 40: Versuchsfahrrad des Modells „Fun Spirit“ der Marke KTM mit Rahmengröße 60 und 28 Zoll „Tyrago“ Tourenreifen von Schwalbe (Quelle: eigene Aufnahme)

Eine Reihe entspricht insgesamt 20 Versuchsfahrten pro Oberfläche: 10 Versuchsfahrten mit und 10 Versuchsfahrten ohne starr geschalteter Federgabel. Somit konnte auch der Einfluss der Federgabel untersucht werden. Damit die Messdauer bei jeder Fahrt annähernd gleich lang ist, wurde zuvor eine Streckenlänge von 55 m abgemessen und markiert. Die Streckenlänge entspricht einer Messdauer von 10 s bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h; diese entspricht in etwa der gemessenen Gesamtdurchschnitts-geschwindigkeit aus Abschnitt 6.3. Da die Anfangsgeschwindigkeit von 20 km/h, aufgrund der Beeinflussung der Messung, welche durch das „in-die-Pedale-treten“ auftreten würde, nicht gehalten werden konnte, betrug die Messdauer schlussendlich etwas mehr als die vorgegebenen 10 s. Zusätzlich erhöhte sich bei einigen wenigen Versuchsfahrten durch Gegenwind die Messdauer entsprechend der Windgeschwindigkeit. Um die Versuchsfahrt in die Auswertung aufnehmen zu können, musste also eine Anfangsgeschwindigkeit von 20 km/h erreicht werden und die Messung musste unbeeinflusst von anderen Verkehrsteilnehmern erfolgen. Die Geschwindigkeit wurde während der Messung über einen Geschwindigkeits- & Trittfrequenz-Sensor von „Runtastic“ bestimmt.

²³ Reifengröße nach European Tyre and Rim Technical Organisation (ETRTO): Reifenbreite = 42 mm, Reifeninnendurchmesser = 622 mm

6 Ergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt die Auswertung der Umfrage (siehe Abschnitt 3 auf S. 38) sowie die der Messungen, auf die in vorherigem Abschnitt eingegangen wurde. Die Auswertung erfolgte mit dem Programm „Excel 2016“ und ist gegliedert in:

- Auswertung & Interpretation der Umfrageergebnisse
- Auswertung & Interpretation der Vergleichsmessungen
- Auswertung & Interpretation aller Geschwindigkeitsmessungen
- Auswertung & Interpretation der Beschleunigungsmessungen | Bestimmung & Bewertung der Oberflächenrauheit
- Gegenüberstellung der Auswertungsergebnisse

6.1 Auswertung & Interpretation der Umfrageergebnisse

An der Umfrage haben insgesamt 261 Personen teilgenommen, von denen allerdings nur 216 die Umfrage vollendeten. Aufgrund der geringen Anzahl und der nicht gleichmäßigen Alters- sowie Herkunftsverteilung (siehe **Abb. 41**) der TeilnehmerInnen werden alle Umfrageergebnisse nachfolgend unabhängig von den in Abschnitt 2.1 erwähnten Kategorien Alter, Ortsgröße bzw. Urbanisierungsgrad und Mobilitätstyp, dargestellt. Ebenfalls bedingt durch die geringe TeilnehmerInnenanzahl, ist die Standardabweichung höher als erhofft, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse entsprechend sinkt.

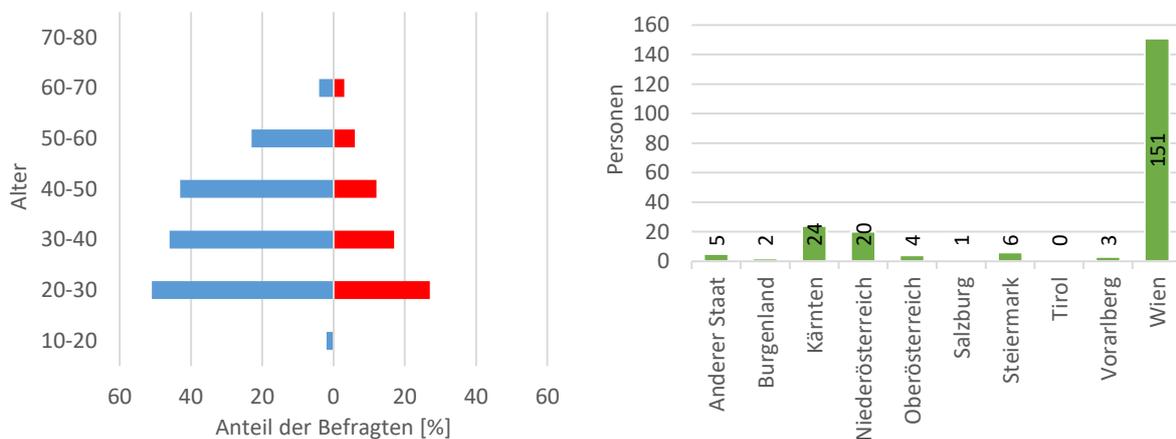


Abb. 41: Links: Alterspyramide der UmfrageteilnehmerInnen, Männer (blau), Frauen (rot) – n = 261 | Rechts: Anzahl der UmfrageteilnehmerInnen pro Bundesland – n = 261

Das Ziel der Umfrage ist zum einen die Beantwortung von **Frage 2** (Welche weiteren Wirkungsgrößen haben einen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen und wie hoch ist der Stellenwert dieser, im Vergleich zum Einfluss der Fahrbahnoberfläche?); Ergebnisse dazu finden sich in Abschnitt 6.1.1 Primäre Umfrageergebnisse. Zum anderen soll dadurch die Literaturrecherche ergänzt werden. Jene Ergebnisse werden in Abschnitt 6.1.2 Sekundäre Umfrageergebnisse dargestellt.

6.1.1 Primäre Umfrageergebnisse

Aus **Abb. 42** geht hervor, dass unter den UmfrageteilnehmerInnen ein zu kleiner Kurvenradius, ein allgemein schlechter Fahrbahnzustand, Straßeneinbauten sowie FußgängerInnen die größte negative Auswirkung auf die Geschwindigkeit von RadfahrerInnen haben. Hingegen haben die Längsneigung, die Lesbarkeit der Bodenmarkierungen, das Tragen von Sicherheitsausrüstung sowie akustische Beeinträchtigungen durch Musik oder anderen Lärm die geringste Auswirkung auf die Geschwindigkeit. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass der Einfluss des Telefonierens bzw. Musikhörens während der Fahrt sehr unterschiedlich bewertet wird; dies ist anhand der hohen Standardabweichung zu erkennen. Ebenfalls muss hervorgehoben werden, dass der Einfluss der Fahrbahnrauheit als eher untergeordnet eingeschätzt wird, während der allgemeine Zustand der Fahrbahn sowie die Straßeneinbauten, wie bereits erwähnt, die Spitzenplätze der Bewertung belegen.

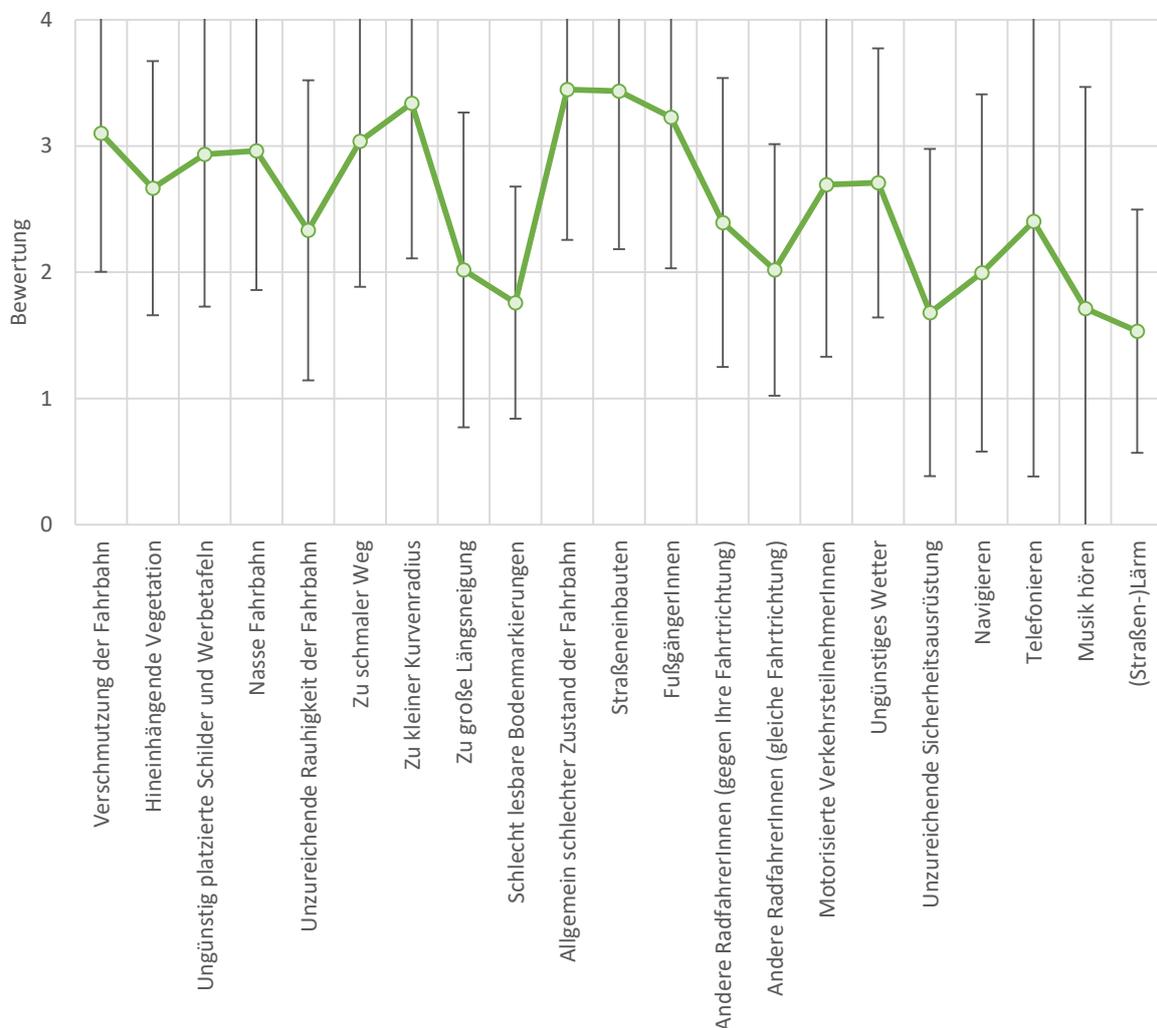


Abb. 42: Fragen 23 - 24: Bitte bewerten Sie die Auswirkung der folgenden EINFLÜSSE AUF IHRE GESCHWINDIGKEIT während dem Fahrradfahren. 0 – Keine Auswirkung, 1 – Eher negative Auswirkung, 2 – Negative Auswirkung, 3 – Eher sehr negative Auswirkung, 4 – Sehr negative Auswirkung – n = 216

In **Abb. 43** ist die mittlere Rangfolge der bevorzugten Fahrbahnoberfläche angegeben. Zwar wird in der Umfrage nach Schnelligkeit, Sicherheit und Komfort unterschieden, da allerdings bei der Durchführung der Umfrage im Großteil der Fälle nicht differenziert wurde, wird hier vom Mittelwert ausgegangen. Die Reihenfolge in **Abb. 43** zeigt auf den ersten Blick deutliche Unterschiede zur Reihenfolge der Rauheit in **Abb. 69**, welche nach der Fahrbahnoberfläche sortiert dargestellt ist. Unter genauerer Betrachtung wird allerdings ersichtlich, dass glatte Oberflächen in beiden Rangfolgen beliebter sind bzw. eine geringere Rauheit aufweisen. Besonders auffallend ist aber, dass Fahrbahnen mit großen, gleichmäßigen Pflastersteinen laut Auswertung der Messergebnisse mit Beton und rauem Asphalt durchaus konkurrenzfähig sind. Dies wird unter den Befragten aber scheinbar noch nicht in dieser Art wahrgenommen. Der Unterschied in der Rangfolge von großen, gleichmäßigen Pflastersteinen in **Abb. 43** und **Abb. 69** könnte möglicherweise durch die verwendeten Reifen begründet werden. **Abb. 44** zufolge werden überwiegend Straßenreifen verwendet, während bei der Messung der Beschleunigungen Tourenreifen mit größerem Profil verwendet wurden. Das gröbere Profil kann in die Fugen der Pflastersteine eindringen und sich somit besser verzahnen als das wesentlich glattere Profil des Straßenreifens. Dadurch ist die Bodenhaftung des Straßenreifens im Vergleich niedriger und führt so zu einer schlechteren Bewertung in **Abb. 43**.

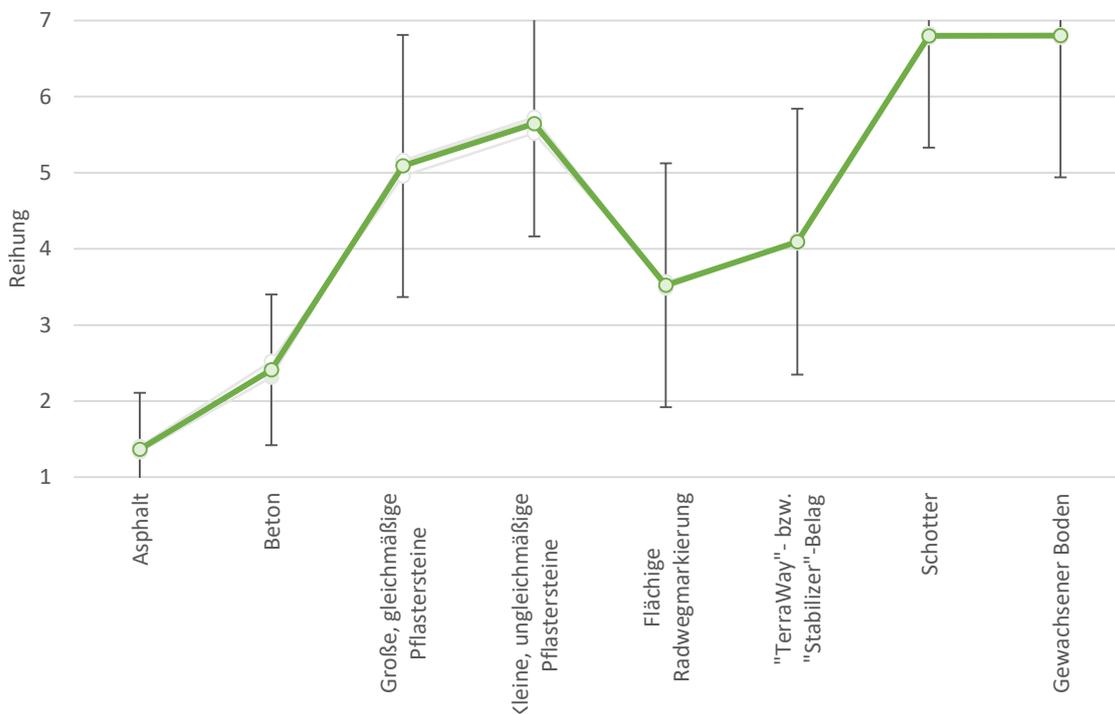


Abb. 43: Fragen 20 - 22: Welche Fahrbahnoberfläche bevorzugen Sie, wenn es darum geht so SCHNELL | SICHER | KOMFORTABEL wie möglich ans Ziel zu kommen? – Jeweilige Reihung (grau), durchschnittliche Reihung (grün) mit zugehöriger Standardabweichung – n = 207-214

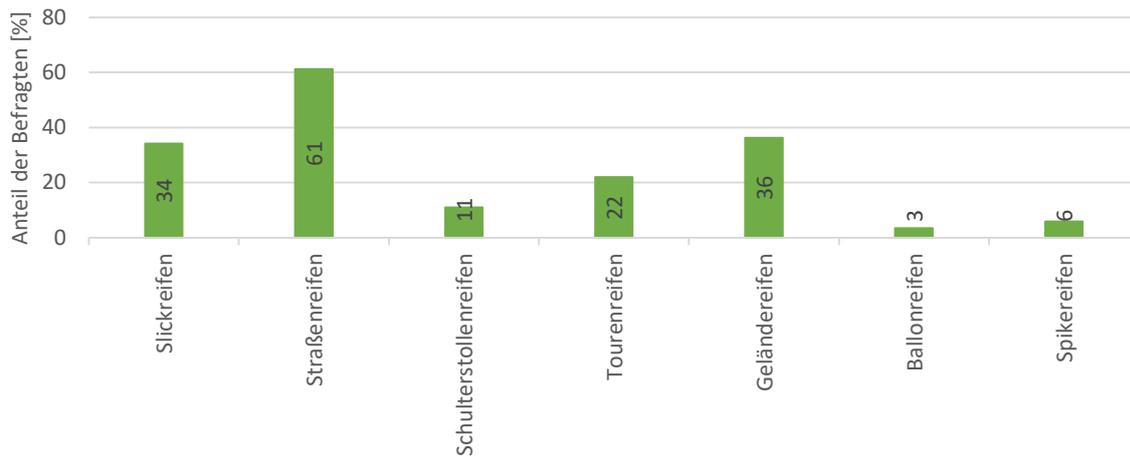


Abb. 44: Frage 16: Welche Reifen verwenden Sie? – n = 237

Des Weiteren ist die Rangfolge von Schotter und kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen vertauscht; das kann möglicherweise auf die erhöhte Verschmutzungsgefahr (aufgewirbelter Staub bei trockenem Wetter; mögliche Schlammgespritzer bei nassem Wetter) beim Befahren von Schotterwegen zurückgeführt werden. Ein weiterer Grund dafür könnte sein, dass die Fahrbahn mit kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen aufgrund der im Vergleich zu Schotterwegen höheren Regelmäßigkeit der Unebenheiten als angenehmer empfunden wird.

Grundsätzlich kann die unterschiedliche Reihung auch mit dem Wartungszustand der Fahrräder in Verbindung stehen. Laut **Abb. 45** wird der Reifendruck zwar durchschnittlich etwa jeden Monat überprüft, jedoch wird in nahezu 50 % der Fälle (vgl. **Abb. 46**) die sogenannte Daumendruckprüfmethode angewandt, welche aber aufgrund ihrer großen Ungenauigkeit keine ausreichende Aussage über den tatsächlichen Reifendruck zulässt. Laut einem der größten Reifenherstellern ist der Schwund von einem Bar Reifendruck pro Monat als normal zu erachten²⁴. Daher kann davon ausgegangen werden, dass im schlechtesten Fall jeder/jede Zweite mit geringem Reifendruck unterwegs ist; dies erhöht zwar den Fahrkomfort zu einem gewissen Grad setzt aber auch gleichzeitig den Rollwiderstand herauf (vgl. Abschnitt 2.2.3.1).

²⁴ vgl. Ralf Bohle GmbH, 2016

6 Ergebnisse

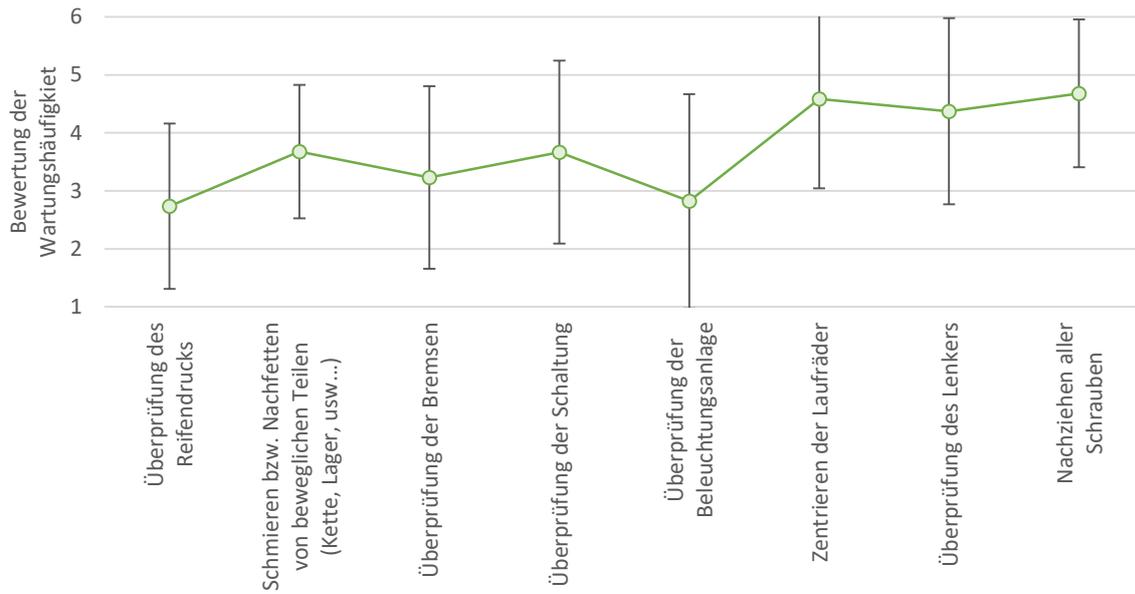


Abb. 45: Frage 18: Wie oft warten Sie bzw. eine von Ihnen beauftragte Fachkraft die einzelnen Bestandteile Ihrer Räder? 1 – Vor jeder Fahrt, 2 – Wöchentlich, 3 – Monatlich, 4 – Seltener als Monatlich, 5 – Jährlich, 6 – Nie – n = 237

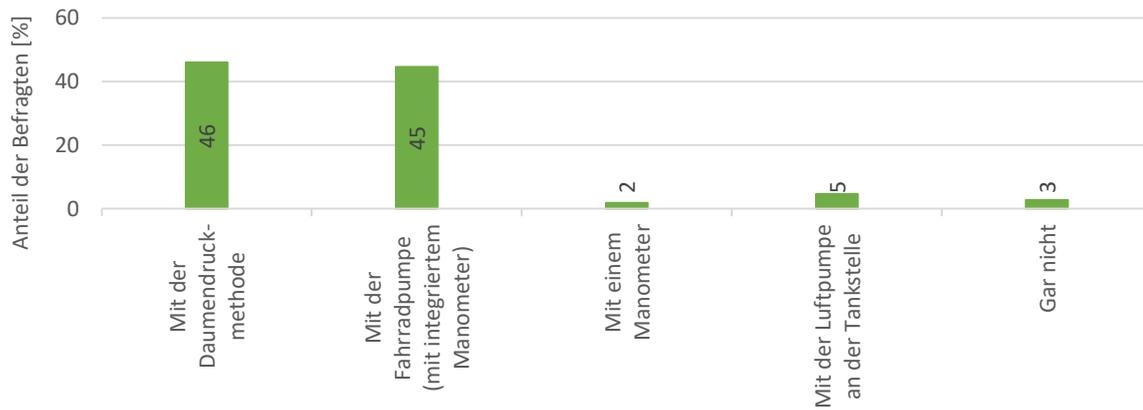


Abb. 46: Frage 19: Wie überprüfen Sie den Reifendruck? – n = 236

Wie in **Abb. 47** gezeigt, stellt sich heraus, dass die meisten RadfahrerInnen, Laufräder mit 28 Zoll Durchmesser verwenden, weshalb es sich als vorteilhaft erwies, dass das Versuchsfahrrad, welches während den Messungen der Beschleunigungen verwendet wurde, ebenfalls mit 28 Zoll Rädern ausgestattet war.

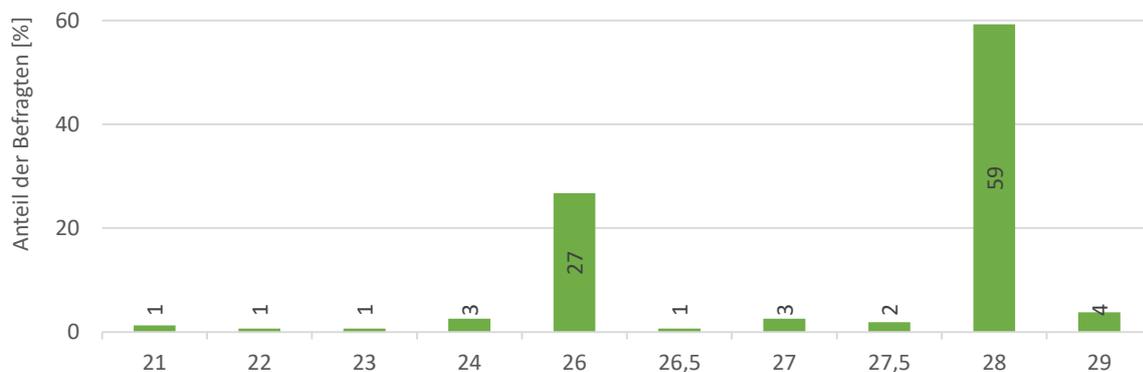


Abb. 47: Frage 17: Bitte geben Sie, falls Ihnen gerade bekannt, den Reifendurchmesser Ihres meistbenutzten Fahrrades in Zoll an. – n = 180

Aus **Abb. 42** ist aufgrund der überwiegend negativen Bewertung des Einflusses anderer VerkehrsteilnehmerInnen ersichtlich, dass auch die Anordnung bzw. die Art des Weges einen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen hat. Interessanterweise wird der Einfluss von FußgängerInnen negativer bewertet als der von motorisierten VerkehrsteilnehmerInnen. Aus **Abb. 48** und **Abb. 49** geht hervor, dass im Prinzip ausschließlich reiner Radverkehr bevorzugt wird, während Mischverkehr mit FußgängerInnen oder motorisierten VerkehrsteilnehmerInnen etwa gleich schlecht eingestuft wird. Aufgrund der dazwischenliegenden Bewertung wird der Radfahrstreifen wohl als Übergang zwischen den zuvor genannten Verkehrsformen betrachtet.

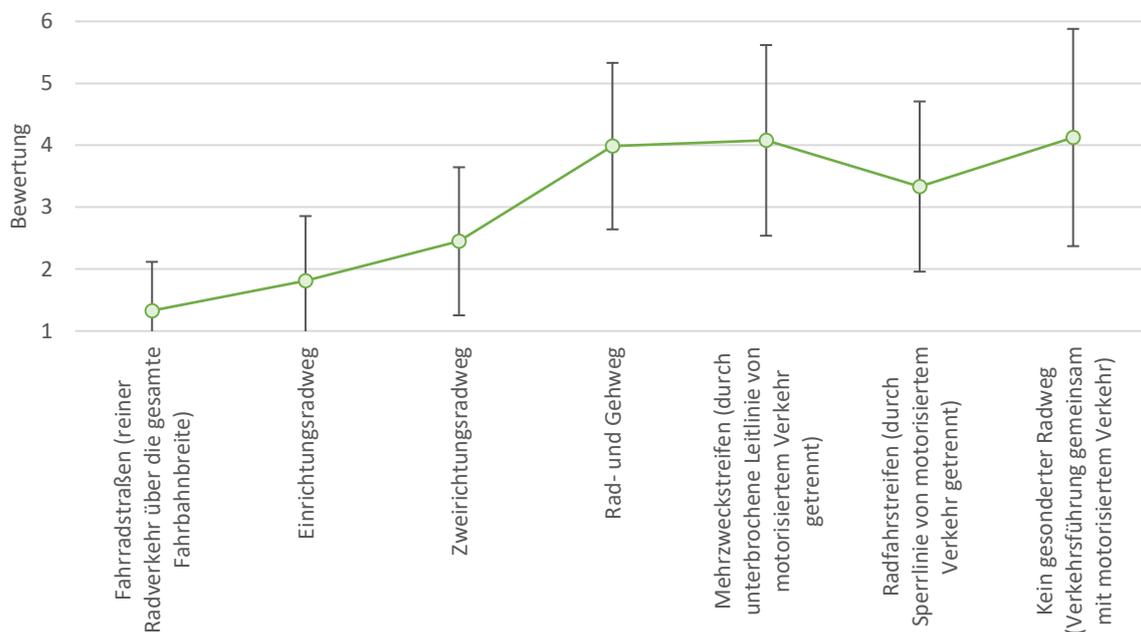


Abb. 48: Frage 25: Bitte bewerten Sie die einzelnen Möglichkeiten der Radweganordnung. – Durchschnittliche Reihung mit zugehöriger Standardabweichung – n = 216

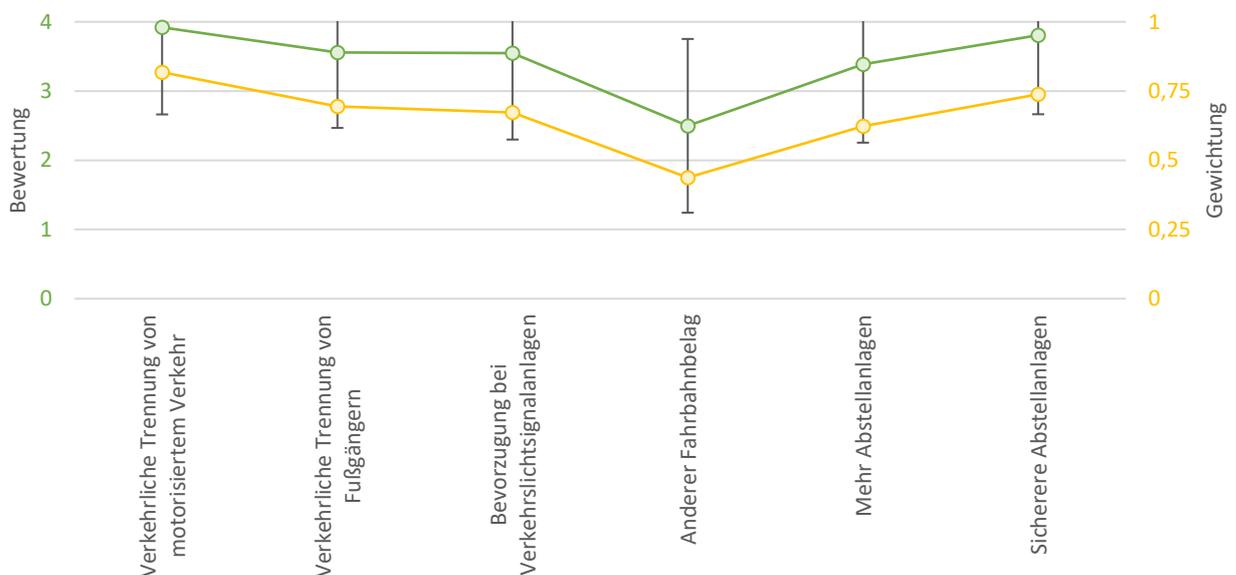


Abb. 49: Frage 12: Was würde Ihrer Meinung nach den Radverkehr fördern? 0 – Fördert ihn nicht, 1 – Fördert ihn eher, 2 – Fördert ihn, 3 – Fördert ihn eher sehr, 4 – Fördert ihn sehr; Gewichtung von 0-1 – n = 241

Auch ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass laut **Abb. 49** das Ändern des Fahrbahnbelags den Radverkehr zwar fördern würde, dies aber unter den zur Auswahl gestellten Maßnahmen die niedrigste Priorität zu haben scheint. Die höhere Priorität der verkehrlichen Trennung von anderen VerkehrsteilnehmerInnen wird auch durch **Abb. 50** bekräftigt.

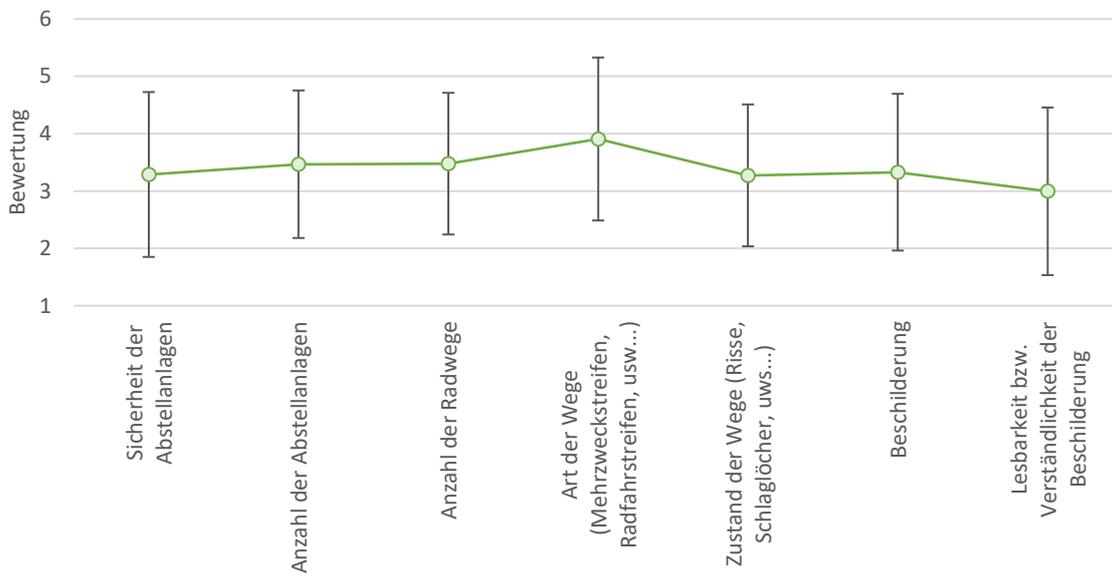


Abb. 50: Frage 13: Wie zufrieden sind Sie mit den einzelnen Bestandteilen der bestehenden Radinfrastruktur?
 1 – Sehr zufrieden, 2 – Zufrieden, 3 – Eher zufrieden, 4 – Eher unzufrieden, 5 – Unzufrieden, 6 – Sehr unzufrieden – n = 240

6.1.2 Sekundäre Umfrageergebnisse

In diesem Abschnitt sind im Sinne der Vollständigkeit die bisher unerwähnten Umfrageergebnisse angeführt, welche vorwiegend die Literaturrecherche ergänzen sollen.

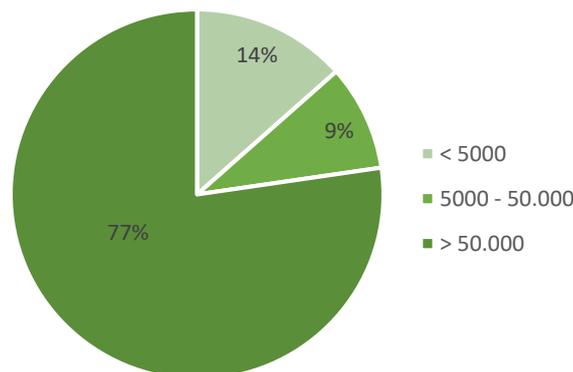


Abb. 51: Frage 4: Wie viele Einwohner hat der Ort bzw. die Stadt in dem/der Sie leben? – n = 261

Wie aus **Abb. 41**, hervorgeht lebt der Großteil der befragten Personen in Wien, woraus der hohe Anteil an Orten mit mehr als 50.000 Einwohnern in **Abb. 51** resultiert.

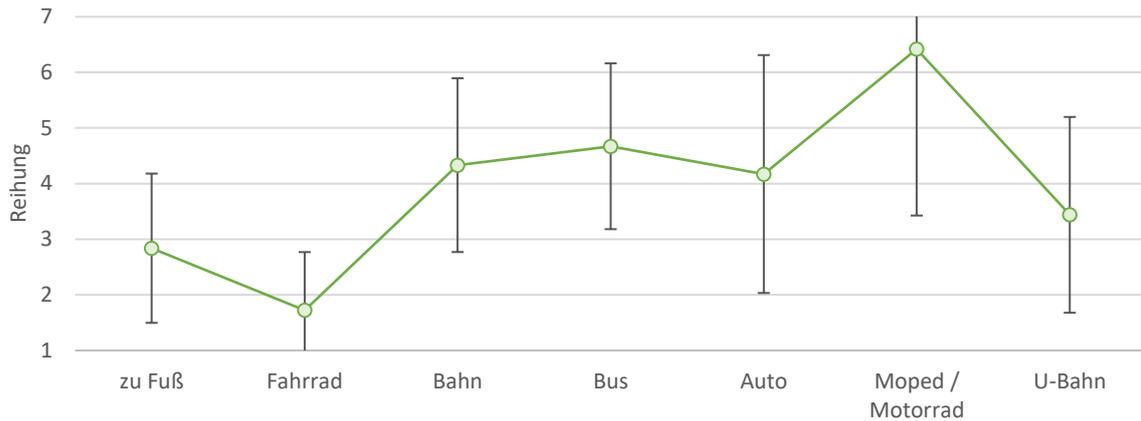


Abb. 52: Frage 5: Welches Fortbewegungsmittel bevorzugen Sie? – Durchschnittliche Reihung mit zugehöriger Standardabweichung – n = 261

Aus **Abb. 52** ist ersichtlich, dass in vorwiegend städtischem Umfeld (vgl. **Abb. 41** und **Abb. 51**) nicht motorisierte Fortbewegungsmittel bevorzugt werden. Darauf folgt etwa gleichauf mit dem zweispurigen MIV der ÖPNV. Das Schlusslicht bildet der einspurige MIV.

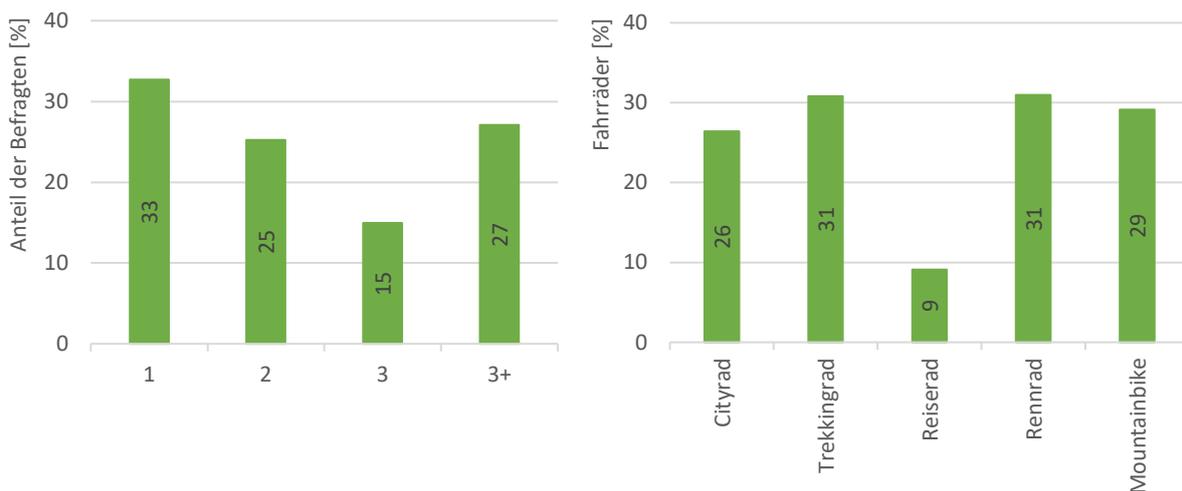


Abb. 53: Frage 6: Wie viele funktionstüchtige Fahrräder welcher Art besitzen Sie?
Links: Nach Anzahl pro Person | Rechts: Gesamtanzahl nach Fahrradtyp – n = 261

Abb. 53 zufolge besitzen zwei Drittel der befragten Personen mehr als ein Fahrrad, wobei die Verteilung der Fahrradtypen, mit Ausnahme des Reiserads, sehr gleichmäßig ist.

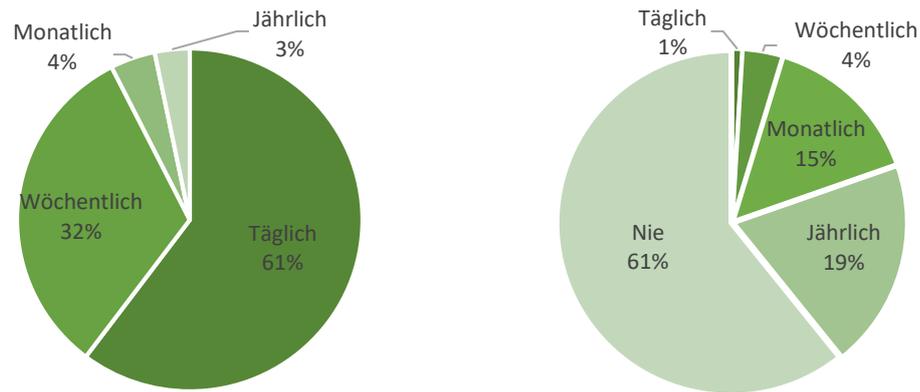


Abb. 54: Links: Frage 7: Wie oft fahren Sie mit dem Fahrrad? – n = 251 | Rechts: Frage 8: Wie oft benutzen Sie Leihfahrräder von Bikesharing-Diensten wie z.B. Citybike in Wien? – n = 250

Ein Vergleich der Nutzungshäufigkeiten aus **Abb. 54** mit den österreichischen²⁵ und Wiener²⁶ Nutzungshäufigkeiten zeigt, dass das Nutzungsverhalten aus **Abb. 54** eher dem städtischen Umfeld entspricht.

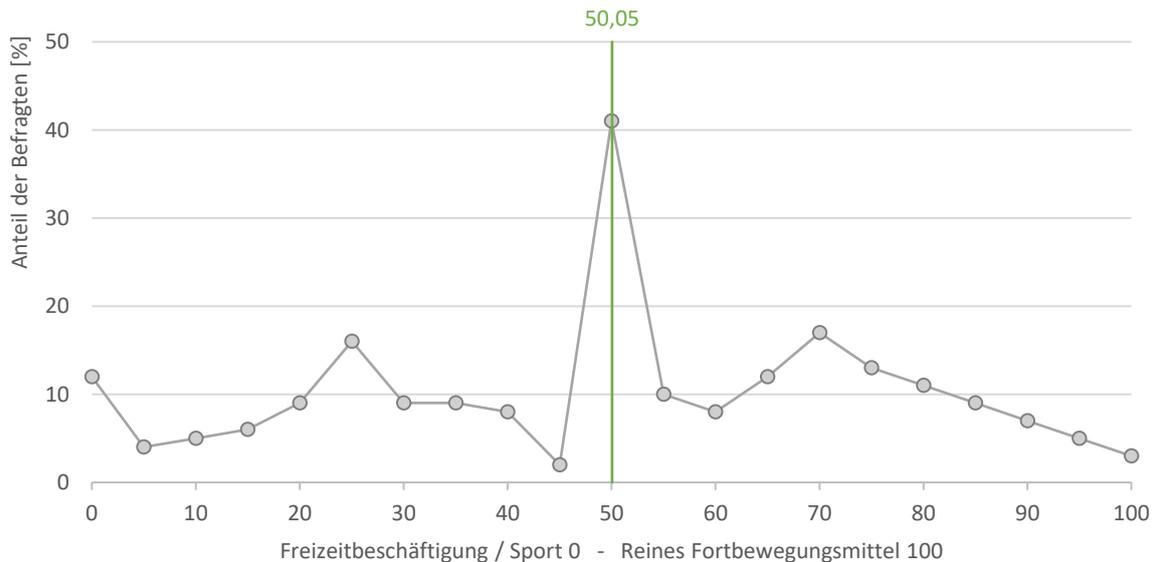


Abb. 55: Frage 9: Was ist Ihre Motivation zum Fahrradfahren? – Angabe auf einer Skala von 0 (= Freizeitbeschäftigung / Sport) bis 100 (= Reines Fortbewegungsmittel) (grau); gewichteter arithmetischer Mittelwert (grün) – n = 253

Abb. 55 zeigt, dass das Fahrradfahren unter den befragten Personen etwa im gleichen Maß als Freizeitbeschäftigung und Fortbewegungsmittel angesehen wird.

Auf die in **Abb. 56** bis **Abb. 58** dargestellten Umfrageergebnisse wurde bereits in Abschnitt 2.1 (S. 12 bis 20) näher eingegangen, da diese für den Vergleich mit bereits zuvor durchgeführten Umfragen²⁷ herangezogen wurden.

²⁵ 12 % – so gut wie täglich, 29 % – einige Male pro Woche, 40 % – einige Male pro Monat, 18 % – seltener (BMVIT, 2013 S. 274)

²⁶ 63 % – mehrmals pro Woche, 31 % – mehrmals pro Monat, 6 % – seltener (Mobilitätsagentur Wien GmbH, 2016 S. 11)

²⁷ vgl. Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009 und Hacker, et al., 2013

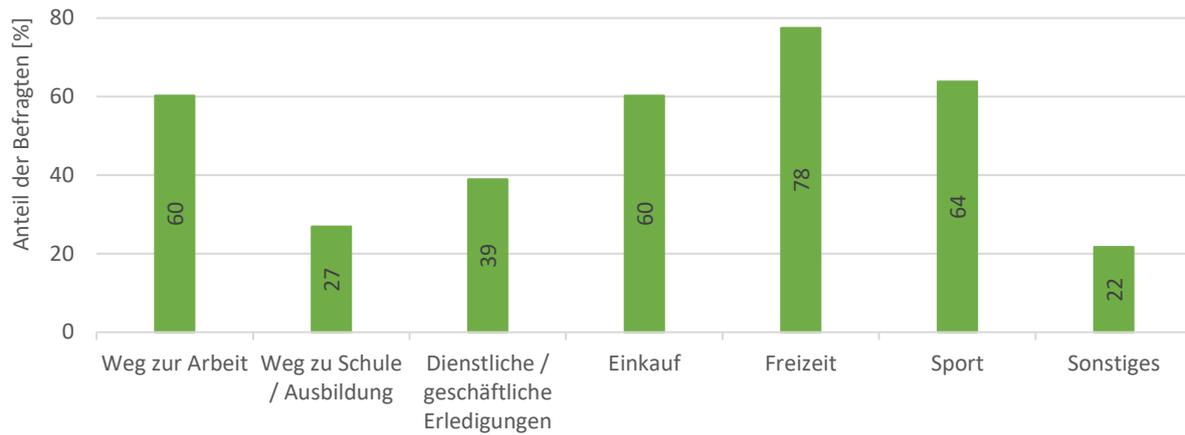


Abb. 56: Frage 10: Welche Alltagswege fahren Sie mit dem Fahrrad zumindest gelegentlich bis zum Ziel? – n = 249

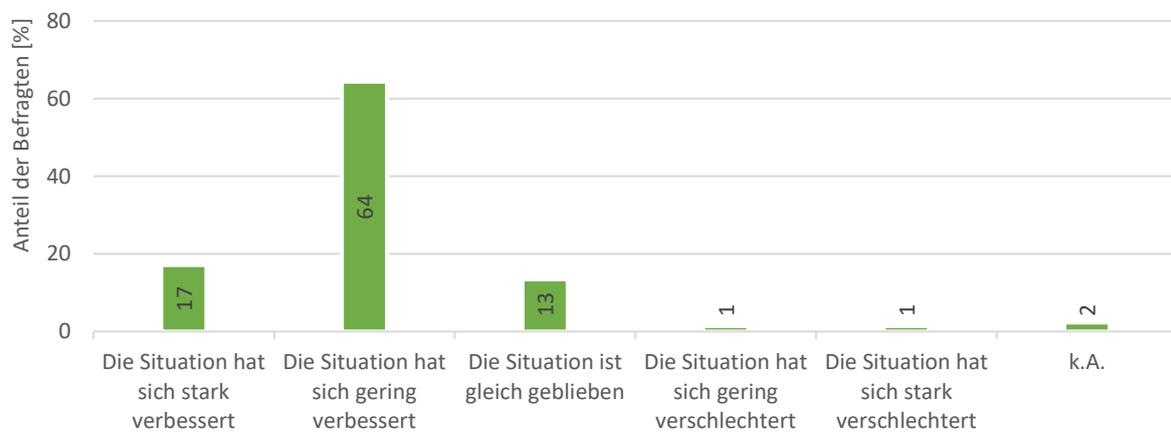


Abb. 57: Frage 14: Wie hat sich die Situation für das Radfahren in den letzten Jahren verändert? – n = 240

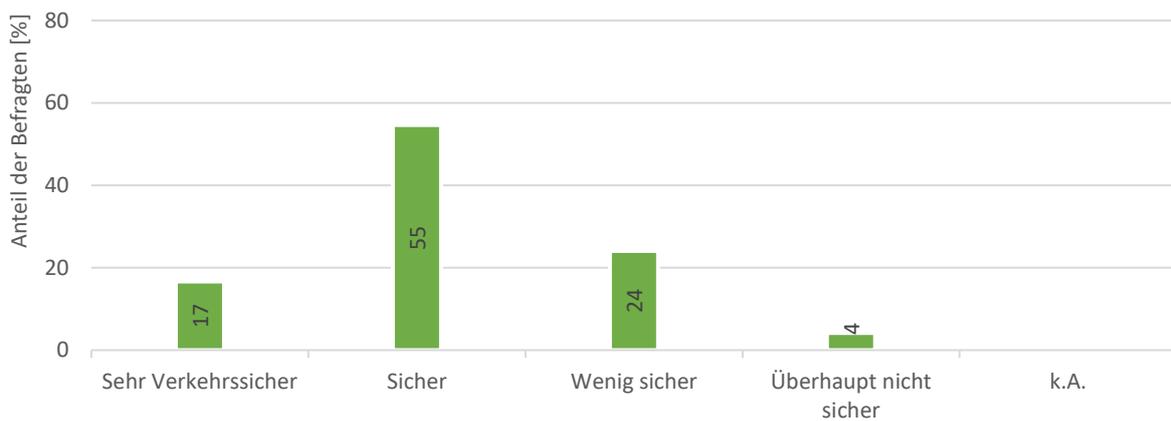


Abb. 58: Frage 15: Wie verkehrssicher fühlen Sie sich beim Radfahren? – n = 239

6.2 Auswertung & Interpretation der Vergleichsmessungen

Die Auswertung der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Vergleichsmessungen erfolgt über Summenhäufigkeitsdiagramme (siehe **Abb. 59** bis **Abb. 61**), in welchen zusätzlich zur gemessenen Geschwindigkeit auch der korrespondierende prozentuelle Anteil der RadfahrerInnen eingezeichnet ist. Anhand dieser Diagramme wird die in 50 % und 85 % der Fälle maximal gefahrene Geschwindigkeit v_{50} und v_{85} abgelesen und verglichen. Ebenso werden die zugehörigen Leistungen P_{50} und P_{85} , die nach den Formeln (1) bis (22) ermittelt werden, ausgewertet und in **Tab. 4** und **Tab. 5** dargestellt.

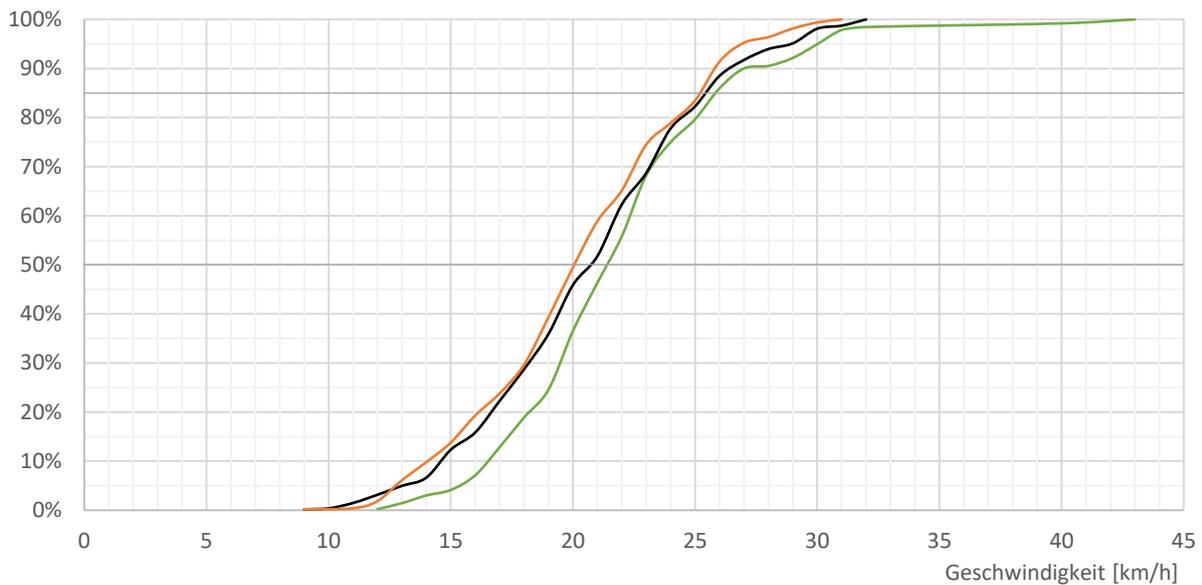


Abb. 59: Summenhäufigkeitsverteilung der auf kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen gemessenen Geschwindigkeiten nach Uhrzeit – 07:00 - 10:00 (grün), 10:00 - 16:00 (schwarz), 16:00 - 19:00 (orange)

Tab. 4: Auswertungsergebnis der Vergleichsmessungen auf kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen nach Zeitraum und Geschlecht

Zeitraum	Geschlecht	Anzahl	Anteil [%]	v_{50} [km/h]	v_{85} [km/h]	P_{50} [W]	P_{85} [W]
07:00 - 10:00	M	157	62,8	22,3	27,2	151,8	200,3
	W	93	37,2	19,7	22,8	114,4	144,6
10:00 - 16:00	M	169	67,6	21,5	25,9	149,1	255,0
	W	81	32,4	17,9	23,3	125,9	203,3
16:00 - 19:00	M	167	66,8	21,0	25,7	137,1	202,6
	W	83	33,2	18,0	22,5	105,4	161,8
07:00 - 19:00	M	493	65,7	21,6	26,2	147,2	205,1
	W	257	34,3	18,7	22,8	110,6	157,2
Differenz	-	236	31,5	2,92	3,39	36,52	47,88
Gesamt	-	750	100	20,7	25,5	137,1	190,3

Aus **Abb. 59** und **Tab. 4** kann entnommen werden, dass wie angenommen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Zeiträumen vorhanden sind; präziser ausgedrückt sinken die Geschwindigkeiten mit fortschreitender Tageszeit. Allerdings ist der

Unterschied von durchschnittlich 0,4 - 0,7 km/h vernachlässigbar klein (dies entspricht $\sim 1,8 - 3,5 \%$ von $v_{50,ges}$), weswegen in den verbleibenden Messungen auf die Uhrzeit keine Rücksicht genommen wurde.

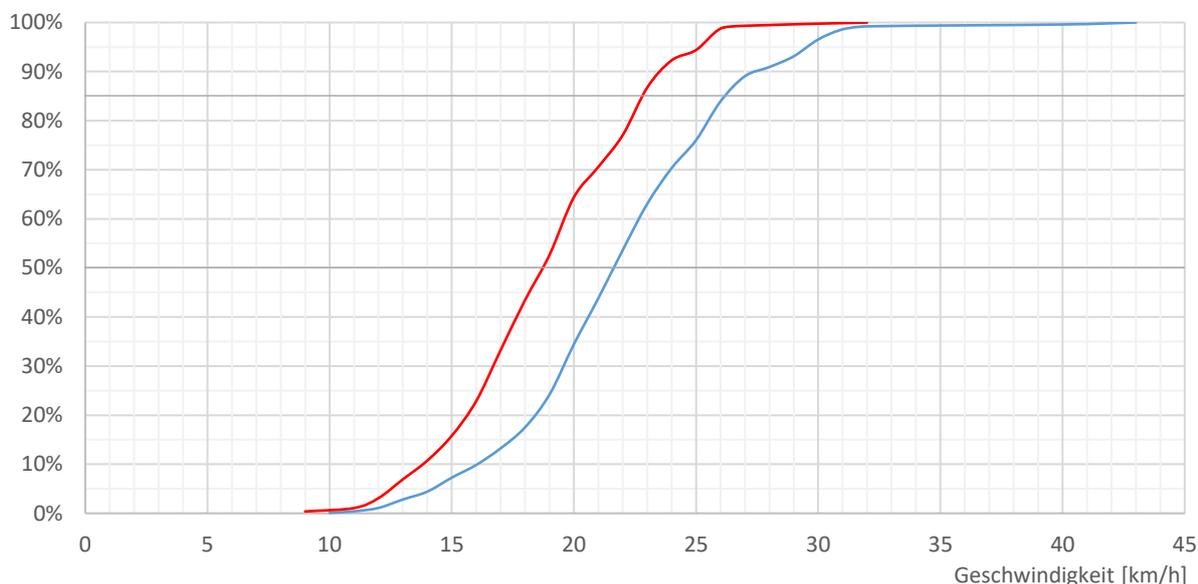


Abb. 60: Summenhäufigkeitsverteilung der auf kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen gemessenen Geschwindigkeiten nach Geschlecht – Männer (blau) Frauen (rot)

Bezüglich der Rolle des Geschlechts ist das Ergebnis eindeutiger: Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Männern und Frauen in **Abb. 60** entspricht annähernd über den gesamten Verlauf der Differenz von 2,9 km/h aus **Tab. 4**. Dies ist im Vergleich zu den oben genannten Unterschieden zwischen den Tageszeiten nicht mehr vernachlässigbar klein (dies entspricht $\sim 14 \%$ von $v_{50,ges}$), jedoch entspricht das Verhältnis zwischen den Geschlechtern von 2:1 auch dem allgemein vorhandenen Verhältnis in Wien²⁸. Aus diesem Grund wurde in den folgenden Messungen der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Geschlechtern nicht weiter berücksichtigt.

Tab. 5: Auswertungsergebnis der Vergleichsmessungen nach Fahrradtyp sowie Gesamt²⁹

Fahrradtyp	Anzahl	Anteil [%]	v_{50} [km/h]	v_{85} [km/h]	v_{mittel} [km/h]	P_{50} [W]	P_{85} [W]	P_{mittel} [W]
Straßen- / Trekkingrad	462	61,6	19,8	23,6	19,5	121,1	175,5	114,6
Mountainbike	123	16,4	22,8	26,5	22,3	151,1	221,3	146,3
Rennrad	110	14,7	24,3	28,5	23,9	169,3	209,3	158,3
Citybike	24	3,2	-	-	14,8	-	-	74,0
Hollandrad	16	2,1	-	-	18,1	-	-	115,3
Klapprad	10	1,3	-	-	14,6	-	-	77,2
Lastenrad	5	0,7	-	-	19,2	-	-	116,1

²⁸ BMVIT, 2013 S. 51

²⁹ Aufgrund der geringen Anzahl mancher Fahrradtypen ist die Bestimmung der zugehörigen Geschwindigkeiten v_{50} und v_{85} bzw. Leistungen P_{50} und P_{85} nicht möglich.

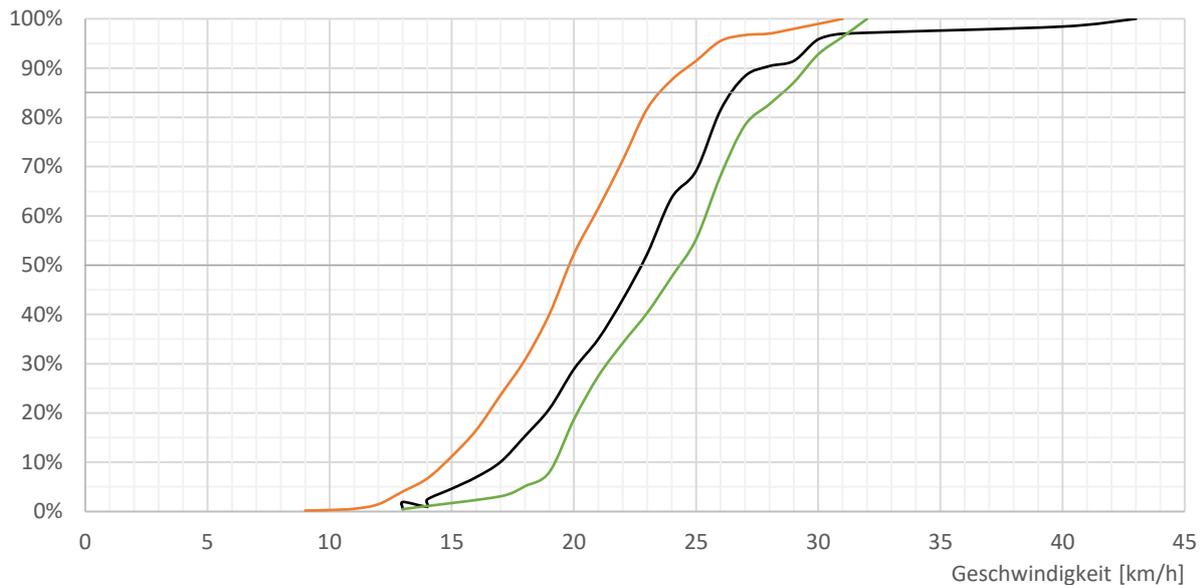


Abb. 61: Summenhäufigkeitsverteilung der auf kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen gemessenen Geschwindigkeiten nach Fahrradtyp – Straßenräder (orange) Mountainbikes (schwarz) Rennräder (grün)

Aus **Tab. 5** und **Abb. 61** geht hervor, dass mit den verschiedenen Fahrradtypen unterschiedliche Geschwindigkeiten gefahren werden. Wie erwartet sind Personen mit Rennrädern am schnellsten, während Personen mit Mountainbikes im Mittelfeld platziert sind und Personen mit Straßenrädern die langsamste Gruppe darstellen. Die kleine Geschwindigkeitsdifferenz von durchschnittlich 1,5 km/h zwischen Mountainbikes und Rennrädern ist vermutlich dadurch zu erklären, dass Rennräder im Gegenteil zu Straßenrädern oder Mountainbikes in der Regel nicht gefedert sind; dieser Umstand wirkt sich auf rauem Untergrund negativ auf die Geschwindigkeit aus. Daher könnte die Geschwindigkeitsdifferenz zu Rennrädern auf glatterem Untergrund größer sein. Prinzipiell ist die Unterscheidung nach Fahrradtypen durchaus interessant, allerdings, wie in **Tab. 5** ersichtlich, ist die Verteilung zwischen den einzelnen Fahrradtypen nicht gleichmäßig; manche Fahrradtypen – Citybikes, Hollandräder, Lastenräder und Klappräder - sind nur sehr selten vertreten. Diese Gegebenheit führt zu einer äußerst beschränkten Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Fahrradtypen. Mangels einer ausreichenden Datengrundlage sind daher in **Abb. 61** nur drei der sieben Fahrradtypen dargestellt.

6.3 Auswertung & Interpretation aller Geschwindigkeitsmessungen

Wie in Abschnitt 6.2 erfolgt die Auswertung der verbleibenden Geschwindigkeitsmessungen ebenfalls über Summenhäufigkeitsdiagramme (siehe **Abb. 62** bis **Abb. 66**), der in 50 % und 85 % der Fälle maximal gefahrene Geschwindigkeit v_{50} und v_{85} und den zugehörigen Leistungen P_{50} und P_{85} (siehe **Tab. 6** bis **Tab. 10**).

Auf sämtlichen Fahrbahnen, mit Ausnahme der Fahrbahn mit kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen (hier waren es wie in Abschnitt 5.2 beschrieben 750 RadfahrerInnen), wurden jeweils die Geschwindigkeiten von 500 RadfahrerInnen gemessen. Eine weitere Ausnahme unter den Fahrbahnen bildet der Schotterweg, da dort im Zeitraum, in dem die Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt wurden, zu den 500 gemessenen RadfahrerInnen noch zusätzlich ~500 RadfahrerInnen mit einer Geschwindigkeit unter dem Messbereich der Radarpistole den Messpunkt passieren. Um diese ebenfalls zu berücksichtigen wurden für die langsameren RadfahrerInnen Zufallsdaten generiert. Dafür wurden aus den vorhandenen Daten jene 149 Datensätze, die eine Geschwindigkeit von 7 bis 18 km/h aufweisen, entnommen. Der niedrige Grenzwert von 7 km/h stellt die niedrigste gemessene Geschwindigkeit dar, deren Messung aufgrund eines, sich in der Nähe befindlichen, schnelleren Verkehrsteilnehmers möglich war. Der obere Wert (18 km/h) stellt die Grenze zum messbaren Bereich der verwendeten Radarpistole dar. Mittels Bootstrapping werden aus den 149 Datensätzen 500 zufällige (konstant verteilte) Ziehungen (mit Zurücklegen) vorgenommen. Um das tatsächliche Geschwindigkeitsprofil besser anzunähern werden die 500 gemessenen Geschwindigkeitswerte um die so bestimmten 500 Zufallswerte ergänzt. Das Ergebnis ist in **Abb. 62** gelb dargestellt.

Zur besseren Veranschaulichung bzw. Vergleichbarkeit werden zusätzlich die den einzelnen Fahrbahnoberflächen zugehörigen Bremswege ermittelt und in **Tab. 6**, **Tab. 7**, **Abb. 63** und **Abb. 64** dargestellt. Der Bremsweg s_b wird dabei mit folgender Formel unter Annahme einer Reaktionszeit von $t_r = 0,5$ s, einer Ansprechzeit von $t_a = 0,45$ s und einer Bremsverzögerung von $a_b = 4 \text{ m/s}^{230}$ berechnet:

$$s_b = v \cdot (t_r + t_a) + \frac{v^2}{2 \cdot a_b} \text{ [m]} \quad (23)$$

Mit dem ersten Term aus Formel (23) wird die Strecke berechnet, welche zwischen dem Zeitpunkt des Erkennens der Gefahr und dem Zeitpunkt an dem der tatsächliche Bremsvorgang beginnt zurückgelegt wird. Über den zweiten Term wird der Weg ermittelt, der rein für den Bremsvorgang benötigt wird.

³⁰ Dies entspricht der durch die Fahrradverordnung vorgegebenen mittleren Bremsverzögerung auf trockener Fahrbahn bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 20 km/h.

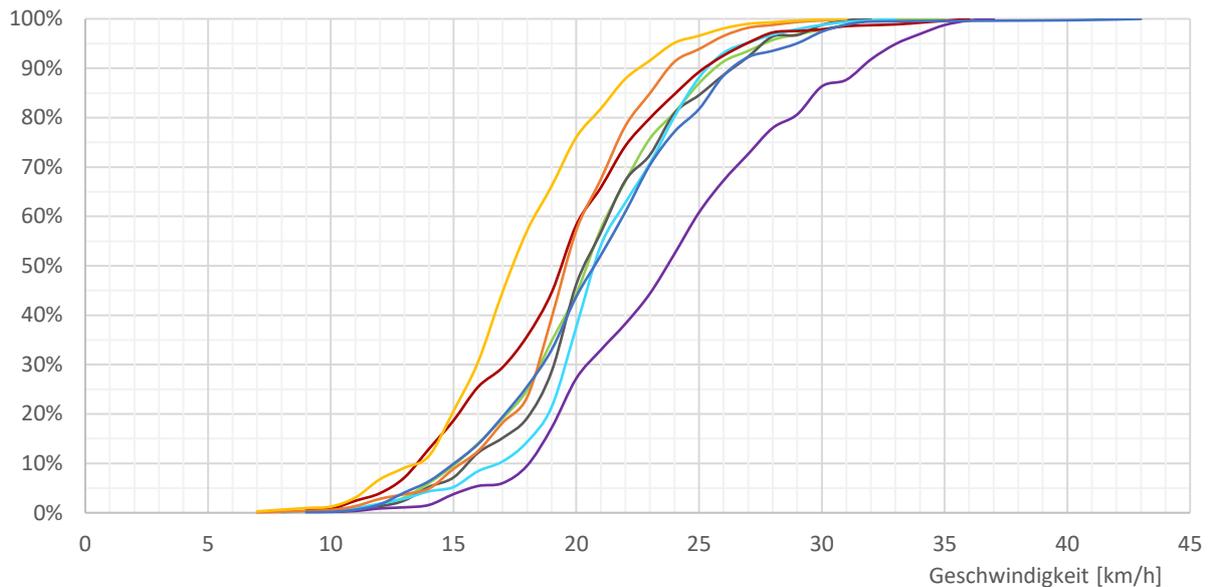


Abb. 62: Summenhäufigkeitsverteilung aller gemessenen Geschwindigkeiten nach Fahrbahnoberfläche
 – Schotter inkl. generierter Daten (gelb), Rauer Asphalt (rot), Schotter (orange), Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine (dunkelblau), Flächige Radwegmarkierung (grün), Glatter Asphalt (dunkelgrau), Große, gleichmäßige Pflastersteine (hellblau), Beton (violett)

Tab. 6: Auswertungsergebnis aller Geschwindigkeitsmessungen

Fahrbahn	Anzahl	v_{50} [km/h]	s_b [m]	Δs_b^{31} [%]	P_{50} [W]
Schotter ³²	1000	17,4	7,5	-14%	96,2
Rauer Asphalt	500	19,4	8,7	+0%	118,5
Schotter	500	19,6	8,9	+1%	115,3
Flächige Radwegmarkierung	500	20,4	9,4	+8%	126,3
Glatter Asphalt	500	20,4	9,4	+7%	137,1
Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine	750	20,7	9,6	+10%	137,1
Große, gleichmäßige Pflastersteine	500	20,7	9,6	+10%	137,1
Beton	500	23,7	11,7	+33%	176,2
Gesamt ³³	4250	20,1	9,2	+22%	125,9
Gesamt	3750	20,6	9,5	+26%	137,1
Differenz	-	0,5	0,3	4%	11,3

Bei Betrachtung von **Abb. 62** und **Tab. 6** fällt auf den ersten Blick auf, dass zwischen den einzelnen Fahrbahnoberflächen (mit Ausnahme der Betonfahrbahn ($v_{50} = 23,7$ km/h, $v_{85} = 29,8$ km/h) und des Schotterweges inkl. generierten Daten ($v_{50} = 17,4$ km/h, $v_{85} = 21,5$ km/h)) keine großen Geschwindigkeitsunterschiede vorhanden sind: $19,4 \leq v_{50} \leq 20,7$ km/h; dies entspricht einer Differenz von $\sim 7\%$. Die Verläufe in **Abb. 62** sind dadurch sehr dicht gruppiert. Im oberen Geschwindigkeitsbereich (siehe **Tab. 7**) sind die Unterschiede etwas höher ($23 \leq v_{85} \leq 25,5$ km/h; dies entspricht einem Unterschied von $\sim 11\%$), scheinen jedoch weiterhin gering auszufallen.

³¹ Prozentuelle Differenz ausgehend von rauem Asphalt.

³² Inklusiv nicht messbarer RadfahrerInnen.

³³ *ibid.*

Tab. 7: Auswertungsergebnis aller Geschwindigkeitsmessungen

Fahrbahn	Anzahl	v_{85} [km/h]	s_b [m]	Δs_b^{34} [%]	P_{85} [W]
Schotter ³⁵	1000	21,5	10,1	-9%	149,1
Schotter	500	23,0	11,2	+0%	161,9
Rauer Asphalt	500	24,1	11,9	+7%	175,5
Große, gleichmäßige Pflastersteine	500	24,6	12,3	+10%	189,9
Flächige Radwegmarkierung	500	24,7	12,4	+11%	189,9
Glatter Asphalt	500	25,1	12,7	+14%	205,1
Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine	750	25,5	13,0	+16%	190,3
Beton	500	29,8	16,4	+47%	286,6
Gesamt ³⁶	4250	25,1	12,7	+25%	189,9
Gesamt	3750	25,4	12,9	+27%	205,1
Differenz	-	0,3	0,1	2%	15,3

Anhand der Bremsweglängen ist jedoch ersichtlich, dass selbst kleine Geschwindigkeitsunterschiede einen großen Einfluss haben können; dies ist darauf zurückzuführen, dass die Geschwindigkeit quadratisch in die Berechnung miteinfließt (siehe Formel (24)) und sich daher überproportional auf die Länge des Bremswegs auswirkt. Daraus ergibt sich in Folge auch der nichtlineare Verlauf in **Abb. 63** und **Abb. 64**.

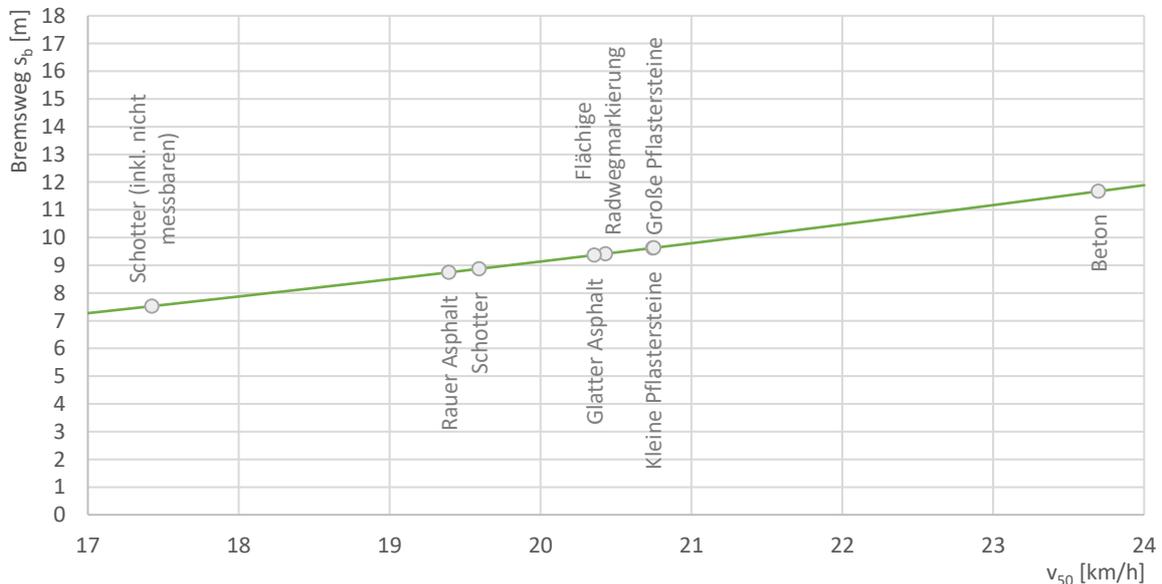


Abb. 63: Zusammenhang zwischen Bremsweg und Geschwindigkeit (grün) mit eingezeichneten Geschwindigkeiten (v_{50}) pro Fahrbahnoberfläche (grau)

³⁴ Prozentuelle Differenz ausgehend von Schotter.

³⁵ Inklusive nicht messbarer RadfahrerInnen

³⁶ ibid.

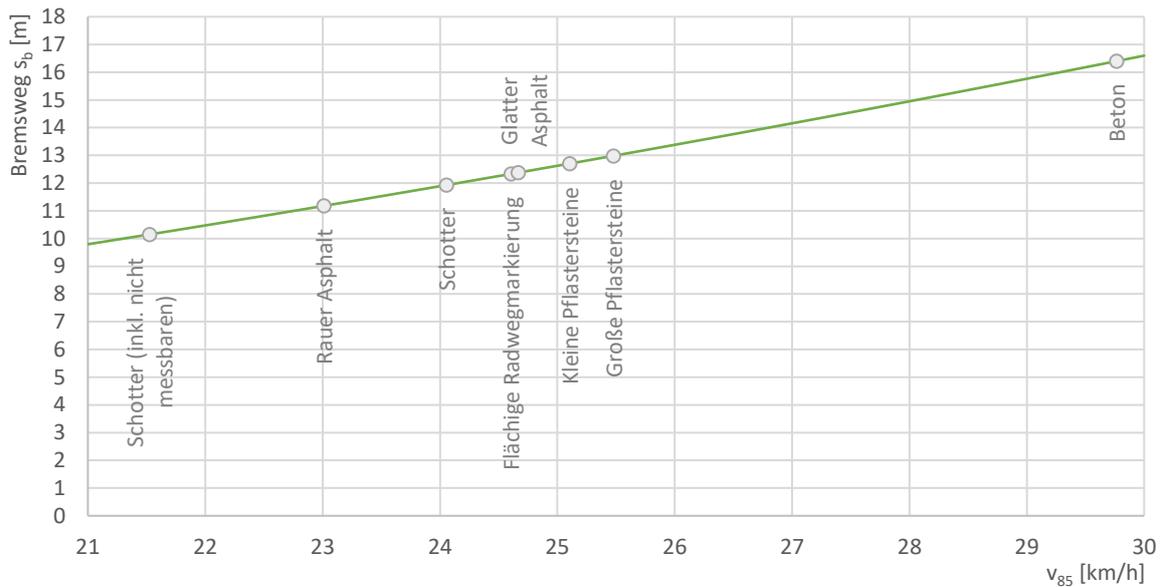


Abb. 64: Zusammenhang zwischen Bremsweg und Geschwindigkeit (grün) mit eingezeichneten Geschwindigkeiten (v_{85}) pro Fahrbahnoberfläche (grau)

Die Länge des Bremsweges beträgt auf den verschiedenen Fahrbahnoberflächen (mit Ausnahme der Betonfahrbahn und des Schotterwegs inkl. generierten Daten) unter Betrachtung der gefahrenen Geschwindigkeiten v_{50} und v_{85} 8,7 bis 9,6 m (dies entspricht einer Differenz von ~10 %) bzw. 11,2 bis 13 m (dies entspricht einer Differenz von ~16 %). Dieser Unterschied kann in manchen Situationen entscheidend sein, weshalb die gemessenen Geschwindigkeitsunterschiede als durchaus bedeutend erachtet werden können.

Laut **Tab. 6** beträgt das 50 %-Quantil der Geschwindigkeiten aller Fahrbahnen 20,1 km/h und die zugehörige Leistung 125,9 W. Dabei wird der größte Teil der Leistung für die Überwindung des Rollreibungswiderstands P_R (~56 %) aufgebracht. Der Rest entfällt auf den Anteil zur Überwindung des Luftwiderstands P_L (~41 %) und den Anteil zur Überwindung der inneren Reibung (~3 %). Anhand des violetten Verlaufs in **Abb. 62** ist ersichtlich, dass RadfahrerInnen auf der Betonoberfläche wesentlich schneller fahren als auf den anderen Fahrbahnoberflächen. Die Tatsache, dass die schnellsten RadfahrerInnen auf der Betonoberfläche und die langsamsten am Schotterweg gemessen wurden, kann zum Teil auf die unterschiedliche Rauheit dieser zwei Fahrbahnoberflächen (siehe Abschnitt 6.4) zurückgeführt werden. Trotz des Einhaltens der in Abschnitt 4 genannten Kriterien ist allerdings davon auszugehen, dass der Geschwindigkeitsunterschied auch zum Teil auf die Wahl und insbesondere auf die Umgebung der Messstandorte zurückzuführen ist. Der Schotterweg befindet sich in einem Naherholungsgebiet und die Betonfahrbahn neben dem verbauten Flussbett des Wienflusses. Dementsprechend sind entlang der Fahrbahnen unterschiedlich attraktive Umgebungen anzutreffen, welche einen psychologischen Einfluss auf die RadfahrerInnen haben könnten: Die Umgebung in einem Naherholungsgebiet wirkt interessant bzw. entspannend und lädt somit zum längeren Verweilen ein, wodurch die Geschwindigkeit der vorbeifahrenden RadfahrerInnen sinkt. Es ist anzunehmen, dass der

Zweck der unmittelbaren Umgebung bzw. das Erlebnis während der Durchfahrt einen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen haben könnte.

Der Vergleich der Messergebnisse mit jenen Geschwindigkeiten der „Bike Citizens Fahrrad Navi GPS“-App-Nutzer, die anfangs in **Tab. 1** (siehe S. 19) genannt wurden, zeigt, dass die gemessenen Geschwindigkeiten um einiges höher sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die NutzerInnendaten der „Bike Citizens Fahrrad Navi GPS“-App, im Gegenteil zu den im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werten, Mittelwerte über die gesamte Fahrdauer darstellen und somit Stopps, wie etwa bei Ampeln, mit eingerechnet sind.

Wie bereits auf der Fahrbahn mit kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen (siehe **Abb. 61**) konnten auch am Schotterweg (siehe **Abb. 65**) innerhalb des Messzeitraums nicht genügend RadfahrerInnen mit den entsprechenden Fahrradtypen gemessen werden, sodass nicht alle dargestellt werden können. Selbst die dargestellten Verläufe in **Abb. 61**, **Abb. 65** und **Abb. 66** sind mit Vorsicht zu betrachten, denn die zugrundeliegenden Daten weisen, wie in **Tab. 8** dargestellt, durchaus unterschiedliche Verteilungen zwischen den einzelnen Fahrradtypen auf.

Tab. 8: Anzahl der gemessenen RadfahrerInnen nach Fahrradtyp auf flächiger Radwegmarkierung, Schotter und kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen

	Flächige Radwegmarkierung	Schotter	Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine
Straßenrad / Trekkingrad	56%	64%	62%
Mountainbike	15%	23%	17%
Rennrad	12%	8%	15%
Hollandrad	7%	2%	2%
Citybike	8%	2%	3%
Klapprad	2%	0%	1%
Lastenrad	1%	1%	1%

Bezüglich der Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Fahrradtypen bestätigen **Tab. 9**, **Tab. 10**, **Abb. 65** und **Abb. 66** den Trend aus **Abb. 61** und **Tab. 5**. Die Reihenfolge der Fahrradtypen ist ident: am schnellsten sind Personen mit Rennrädern, gefolgt von Mountainbikes und Straßenrädern. Im Gegensatz zu **Abb. 61** und **Abb. 65** sind in **Abb. 66**, aufgrund des höheren Anteils selbiger Fahrradtypen, zusätzlich die Verläufe von Citybikes und Hollandrädern dargestellt.

Tab. 9: Die in 50% der Fälle zu erwartende maximale Geschwindigkeit nach Fahrbahnoberfläche und Fahrradtyp

V_{50} [km/h]	Citybike	Hollandrad	Straßen- / Trekkingrad	Mountainbike	Rennrad
Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine	-	-	19,8	22,8	24,3
Schotter	-	-	19,3	20,5	21,6
Fl. Radwegmarkierung	16,7	18,1	20,1	21,7	24,4

Tab. 10: Die in 85% der Fälle zu erwartende maximale Geschwindigkeit nach Fahrbahnoberfläche und Fahrradtyp

V ₈₅ [km/h]	Citybike	Hollandrad	Straßen- / Trekkingrad	Mountainbike	Rennrad
Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine	-	-	23,6	26,5	28,5
Schotter	-	-	21,9	24,5	23,9
Fl. Radwegmarkierung	20,6	20,0	23,3	25,9	29,0

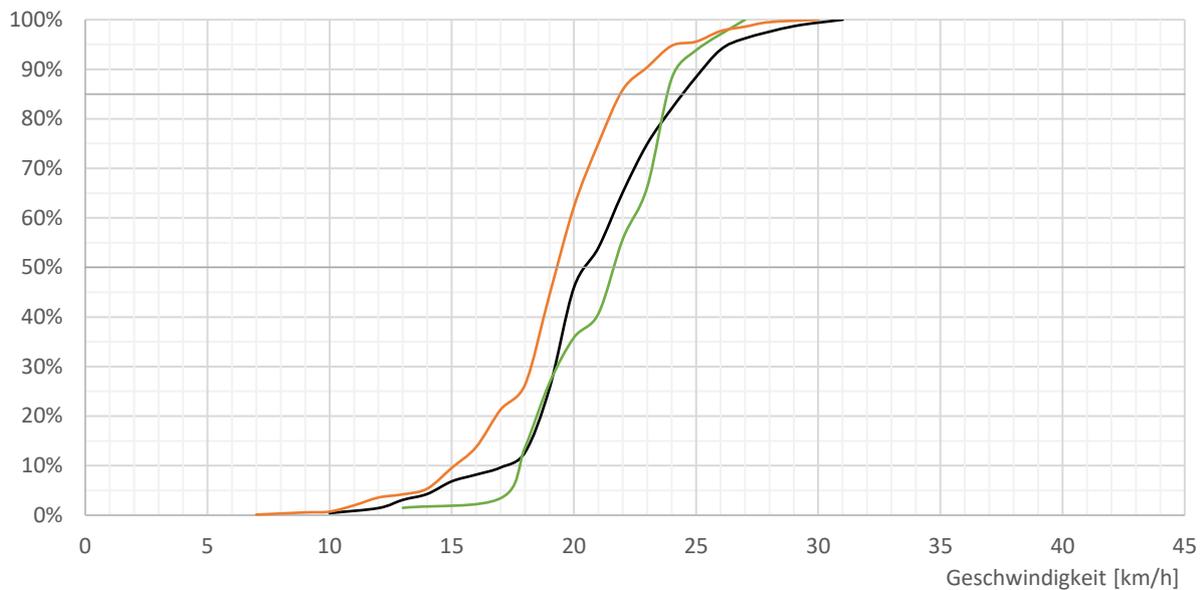


Abb. 65: Summenhäufigkeitsverteilung der auf Schotterwegen gemessenen Geschwindigkeiten nach Fahrradtyp – Straßenräder (orange) Mountainbikes (Schwarz) Rennräder (grün)

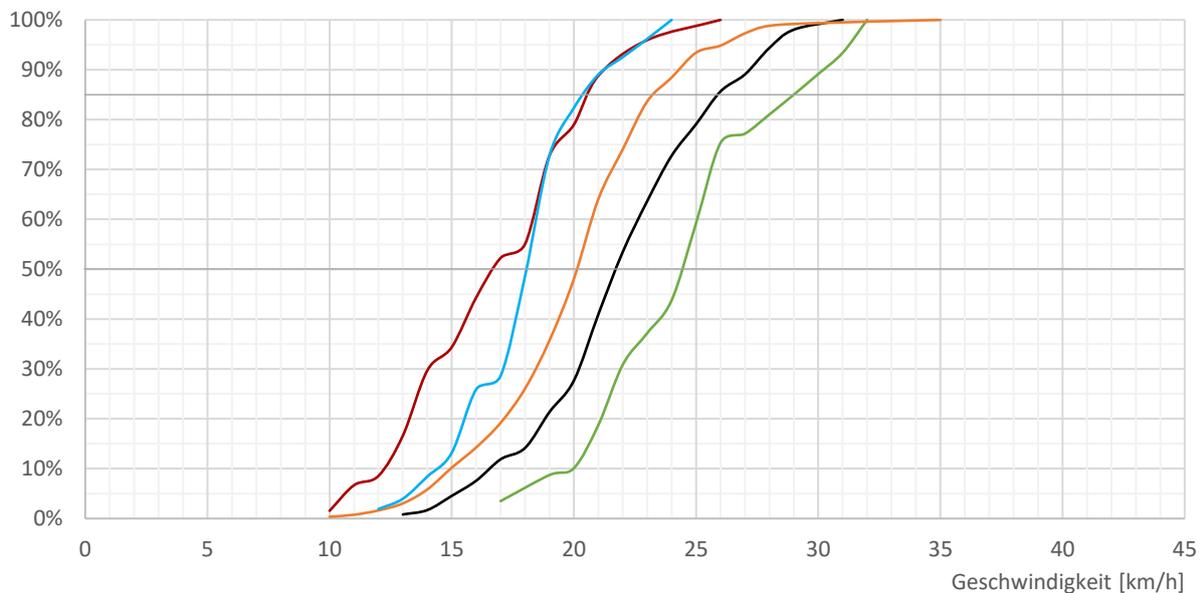


Abb. 66: Summenhäufigkeitsverteilung der auf flächiger Radwegmarkierung gemessenen Geschwindigkeiten nach Fahrradtyp – Citybikes (rot), Hollandräder (hellblau), Straßenräder (orange), Mountainbikes (schwarz), Rennräder (grün)

Mit Hinblick auf den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Fahrbahnoberfläche zeichnet sich folgendes nachvollziehbares Bild ab: Je rauer und unregelmäßiger die Oberfläche ist, umso kleiner sind die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Fahrradtypen. Grund dafür ist der

unterschiedliche Aufbau dieser. Die ausschlaggebenden Bestandteile bzw. Faktoren der einzelnen Fahrradtypen sind die Federung, der Reifen und der Reifendruck. Während an üblicherweise nicht gefederten Rennrädern in der Regel schmale Reifen mit glattem Profil und hohem Druck verbaut sind, haben nicht immer gefederte Straßenräder, und i.d.R. gefederte Mountainbikes, breite Reifen mit grobem Profil und, im Vergleich zu Rennrädern, niedrigeren Reifendruck.

6.4 Auswertung & Interpretation der Beschleunigungsmessungen | Bestimmung & Bewertung der Oberflächenrauheit

Wie in Abschnitt 5.4 bereits beschrieben wurde pro Oberfläche und Federkonfiguration (weiche und starrer Federgabel) eine Messreihe mit insgesamt 10 Messfahrten und unterschiedlicher Messdauer durchgeführt. Die aus den Messfahrten gewonnenen Rohdaten, bestehend aus den Beschleunigungen in die x-, y- und z-Richtung (Telefonachsen) werden anschließend jeweils am Anfang und Ende um 1 s gekürzt. Somit werden Messungenauigkeiten, die durch die Bedienung des Mobiltelefons am Beginn und am Ende der Versuchsfahrt verursacht werden, ausgeschlossen. Die Abtastrate des Sensors betrug während den Messfahrten 50 Hz, sodass abhängig von der Messdauer pro Überfahrt mehrere Hundert Messwerte in jede Richtung der Telefonachsen aufgezeichnet wurden. Die Messwerte einer Messreihe werden nun hintereinander gereiht und als eine lange Messfahrt betrachtet.

In einem ersten Rechenschritt müssen die Beschleunigungen, aufgrund des um 10° geneigten Oberrohrs, mit einer Kalibrierungsmessung angepasst bzw. auf die Fahrradachsen umgerechnet werden. Während der 90 s lang andauernden Kalibrierungsmessung lag das Mobiltelefon auf einer waagrecht ausgerichteten Oberfläche, sodass die Beschleunigungen in x- und y-Richtung annähernd Null betragen. So wurde nur noch die in z-Richtung wirkende Erdbeschleunigung erfasst. Die Abtastrate des Beschleunigungssensors betrug in Ruhelage 5 Hz woraus in dem oben genannten Zeitraum insgesamt 450 Messwerte resultierten. Im Durchschnitt betrug die so gemessene Erdbeschleunigung $9,38 \text{ m/s}^2$; dies entspricht allerdings nicht der örtlich herrschenden Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$. Um diesen Umstand zu berücksichtigen werden die Anteile der gemessenen Erdbeschleunigung in y- und z-Richtung bestimmt:

$$a_{y,korr} = 9,38 \cdot \sin(10) = 1,63 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (24)$$

$$a_{z,korr} = 9,38 \cdot \cos(10) = 9,24 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (25)$$

Anschließend wird von allen Messwerten der entsprechende Korrekturwert abgezogen, womit nun die tatsächlich, zufolge der Einwirkung der Fahrbahnoberfläche, wirkenden Beschleunigungen pro Messreihe zur Verfügung stehen.

Im nächsten Schritt wird mit zwei aufeinander folgenden numerischen Integralen über die Zeit zuerst die Geschwindigkeit und in weiterer Folge die Distanz zwischen zwei Messwerten bzw. Messzeitpunkten pro Achse berechnet:

$$\int a_i dt = v_i \left[\frac{m}{s} \right] \quad (26)$$

$$\int v_i dt = s_i [m] \quad (27)$$

Um beurteilen zu können welche der drei Achsen (x, y oder z) die maßgebende ist, wurden Scatterplots (siehe Anhang) mit Regressionsgeraden erstellt, wobei die Entfernungen (s_x , s_y und s_z), die das Mobiltelefon während den Überfahrten in die einzelnen Richtungen zurückgelegt hat, als unabhängige Variablen und die gesamte Entfernung als abhängige Variable betrachtet wurden. Die Gesamtentfernung s_{ges} wird hierfür über den Satz von Pythagoras bestimmt:

$$s_{ges} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2} \quad (28)$$

Wie aus den Scatterplots (siehe Anhang), **Abb. 67** und **Abb. 68** ersichtlich, befinden sich die Regressionsgeraden der z-Achse in 12 von 14 Fällen am nächsten zur 1. Mediane (dies entspricht der niedrigsten Steigung) und weisen ein Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,9$ auf, woraus geschlossen werden kann, dass die z-Achse die maßgebendste Komponente darstellt.

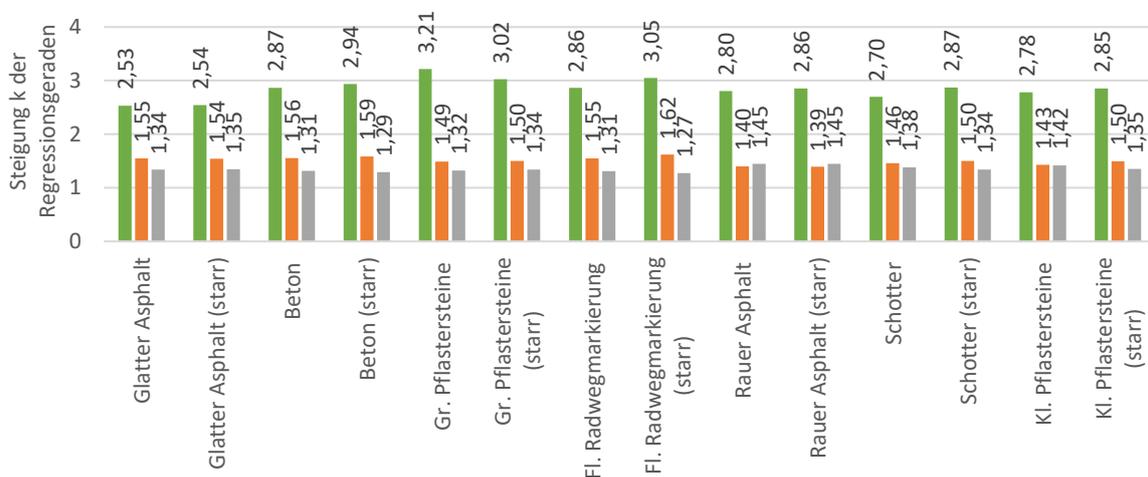


Abb. 67: Steigung k der Regressionsgeraden für die Punktwolken der x- (grün), y- (orange) und z-Achse (grau) (Scatterplots siehe Anhang)

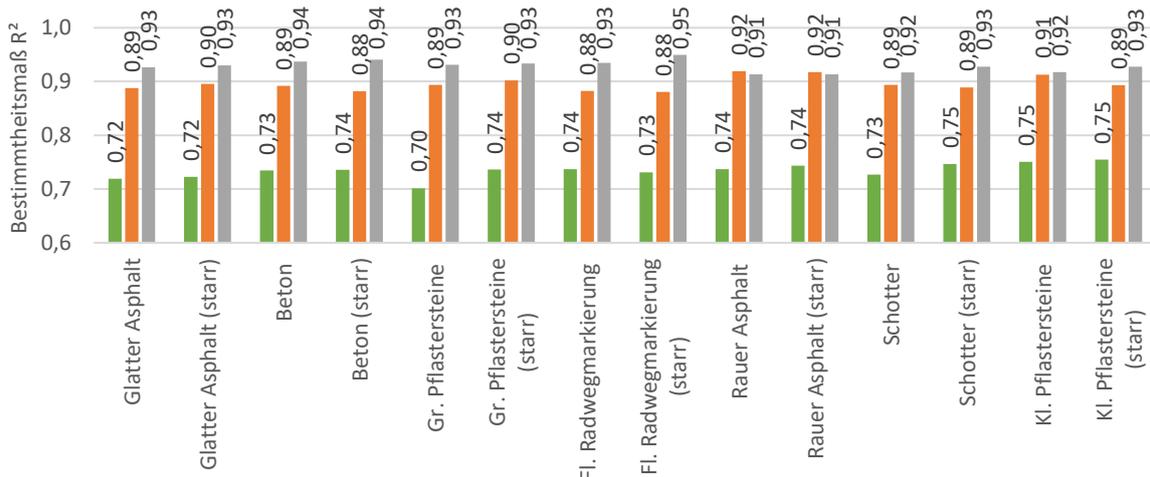


Abb. 68: Bestimmtheitsmaß R^2 der Regressionsgeraden für die Punktwolken der x- (grün), y- (orange) und z-Achse (grau) (Scatterplots siehe Anhang)

Wie oben erwähnt weisen die Messfahrten und somit auch die Messreihen eine unterschiedliche Messdauer auf. Um dies in der Auswertung zu berücksichtigen werden die Entfernungen pro Achse auf eine Dauer von einer Minute bezogen:

$$s_{i,60} = s_i \cdot \frac{60}{t_i} \quad (29)$$

Somit kann die Rauheit der Oberflächen über die Betrachtung der während der Fahrt in z-Richtung zurückgelegten Entfernungen beurteilt und verglichen werden.

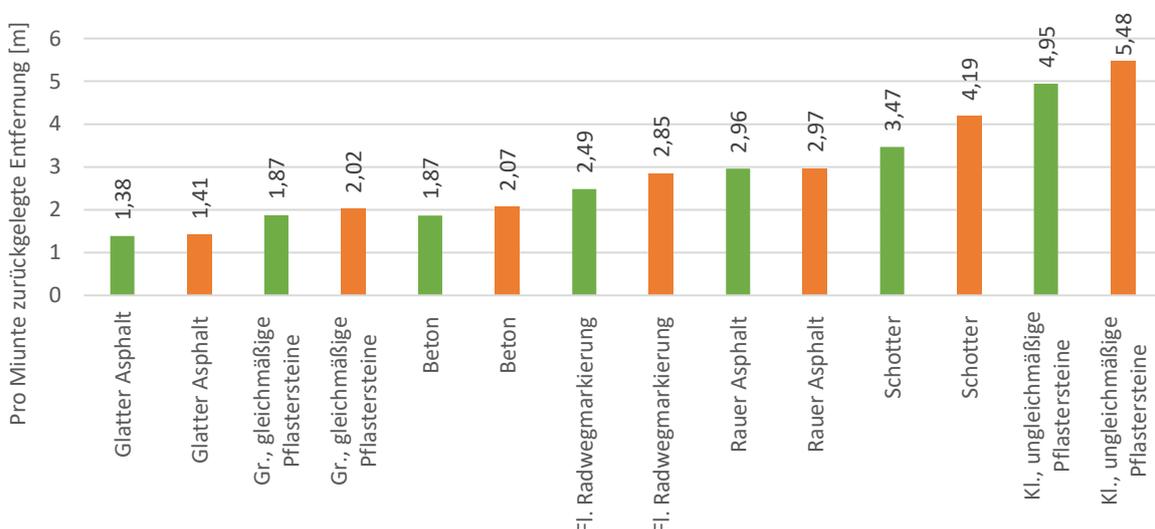


Abb. 69: Auf verschiedenen Oberflächen pro Minute zurückgelegte Entfernung in z-Richtung mit weicher (grün) und starrer (orange) Feder

Die in **Abb. 69** gezeigte Reihenfolge der untersuchten Fahrbahnoberflächen birgt zwei Erkenntnisse: Zum einen die Positionierung der Fahrbahn mit großen, gleichmäßigen Pflastersteinen und zum anderen die hinter den Erwartungen zurückgebliebene Fahrbahn mit flächiger Radwegmarkierung. Die vergleichsweise geringen Entfernungen, die auf der Fahrbahn mit großen, gleichmäßigen Pflastersteinen ermittelt wurden, können zum Teil auf das während den Messungen verwendete

Reifenprofil zurückgeführt werden: Bei Kontakt mit glatten Oberflächen verbiegen bzw. stauchen sich die Stollen des Reifenprofils; dies ruft neben einem höheren Rollwiderstand auch stärkere Beschleunigungen und somit höhere Entfernungen hervor. Im Falle der Fahrbahn mit großen, gleichmäßigen Pflastersteinen können die Stollen in die zwischen den Pflastersteinen liegenden Fugen eindringen, wodurch geringere Vibrationen und somit auch geringere Beschleunigungen entstehen. Wieso dieser Effekt nur bei der Fahrbahn mit großen, gleichmäßigen Pflastersteinen, nicht aber in ähnlichem Ausmaß bei der Fahrbahn mit kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen, wo eine wesentlich höhere Entfernung ermittelt wurde, zum Tragen kommt, liegt vermutlich an der Ebenheit der Pflastersteine selbst: Aus **Abb. 36** (S. 46) und **Abb. 37** (S. 47) ist klar ersichtlich, dass die großen Pflastersteine eine wesentlich glattere Oberfläche aufweisen als die kleinen Pflastersteine. Außerdem spielt in diesem Zusammenhang auch die Breite und Regelmäßigkeit der Fugen eine Rolle; beides variiert im Falle der kleinen Pflastersteine stark, während dies bei den großen Pflastersteinen nicht der Fall ist.

Bezüglich der flächigen Fahrbahnmarkierung wurde von der Annahme ausgegangen, dass die in flüssiger Form aufgebrachte flächige Fahrbahnmarkierung in die Ritzen und Risse des darunterliegenden Materials eindringt und diese verschließt, woraus eine glattere Fahrbahnoberfläche resultiert. Folglich wurde angenommen, dass diese bei den Beschleunigungsmessungen die glatteste Fahrbahn darstellen würde. Die tatsächliche Positionierung der flächigen Radwegmarkierung kann allerdings durch die beschädigte Asphaltdeckschicht unter der Markierung begründet werden. Denn wäre die darunterliegende Deckschicht in besserem Zustand, könnten hier möglicherweise niedrigere Entfernungen erzielt werden. Daraus abzuleiten ist, dass der Einfluss der Markierung selbst im Vergleich zur darunterliegenden Deckschicht wohl eine eher untergeordnete Rolle spielt.

6.5 Gegenüberstellung der Auswertungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Auswertungsergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen mit den Ergebnissen der Beschleunigungsmessungen verglichen und ein möglicher Zusammenhang abgeleitet.

Die in 50 % bzw. 85 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeiten v_{50} und v_{85} werden der aufgrund von Vibrationen zurückgelegten Entfernung in z-Richtung s_z in **Abb. 70** und **Abb. 71** gegenübergestellt. Auf den ersten Blick ergibt sich folgender Zusammenhang: Je rauer der Untergrund ist, umso niedriger ist auch die gewählte Geschwindigkeit.

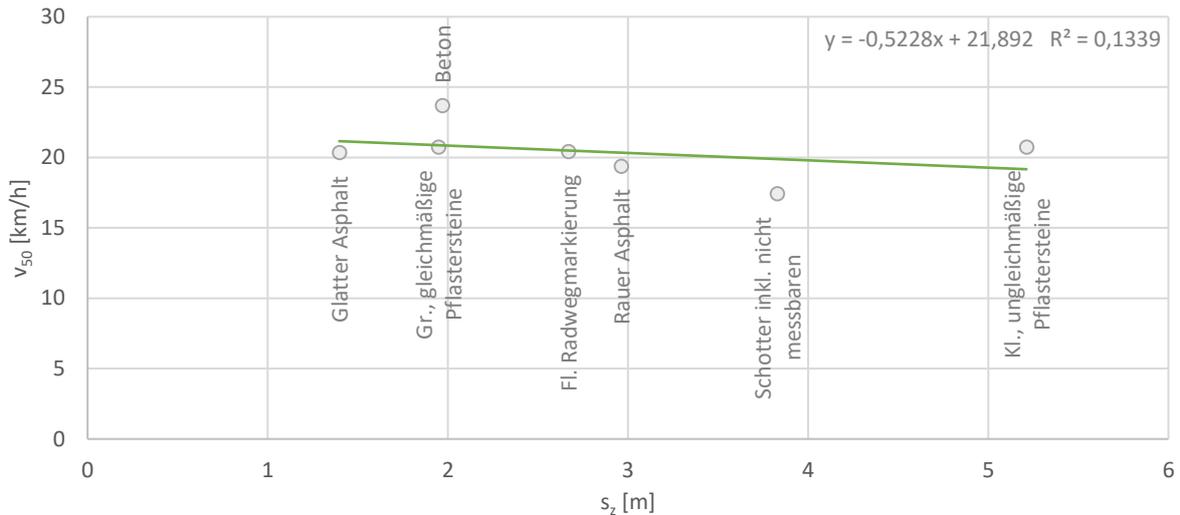


Abb. 70: Gegenüberstellung der in 50 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeit v_{50} und der zufolge Vibrationen zurückgelegten Entfernung s_z – nach Fahrbahnoberflächen (grau) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün)

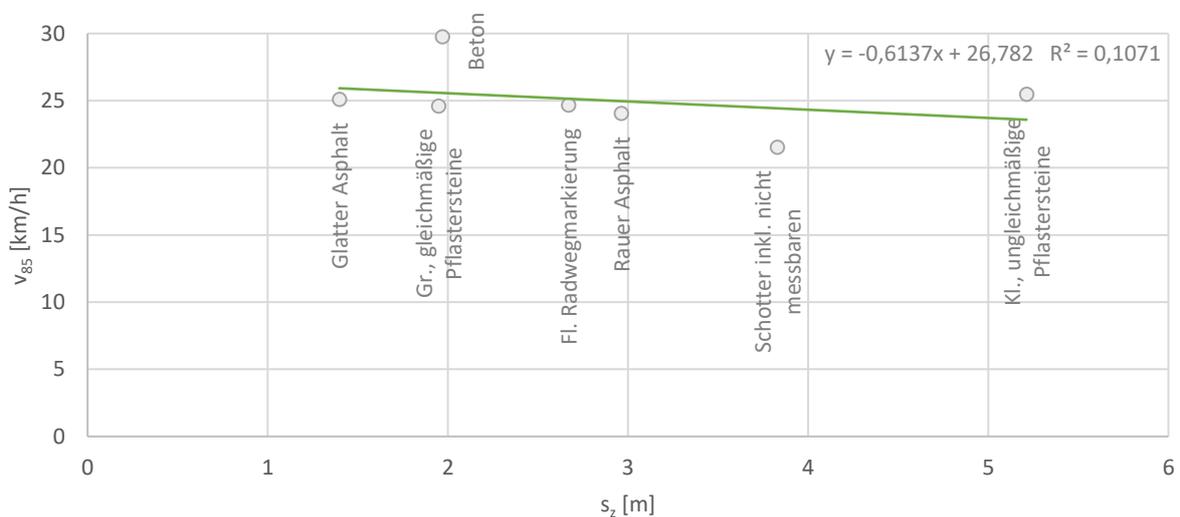


Abb. 71: Gegenüberstellung der in 85 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeit v_{85} und der zufolge Vibrationen zurückgelegten Entfernung s_z – nach Fahrbahnoberflächen (grau) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün)

Allerdings ist dieses Ergebnis kritisch zu betrachten, da:

- das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgerade sehr niedrig ist,
- die Stichprobe mit nur sieben Werten sehr klein ist
- und zusätzlich handelt es sich bei zwei von sieben Punkten (Schotter- und Betonfahrbahn) um Ausreißer, welche vermutlich durch den nicht berücksichtigten psychologischen Einfluss der Umgebung (vgl. Abschnitt 6.3) verursacht wurden. Ferner verstärkt sich aufgrund der kleinen Stichprobe der Einfluss der Ausreißer auf die Regressionsgerade.

Werden die Ausreißer in den Daten nicht berücksichtigt zeigt sich zufolge **Abb. 72** und **Abb. 73** ein anderes Bild.

6 Ergebnisse

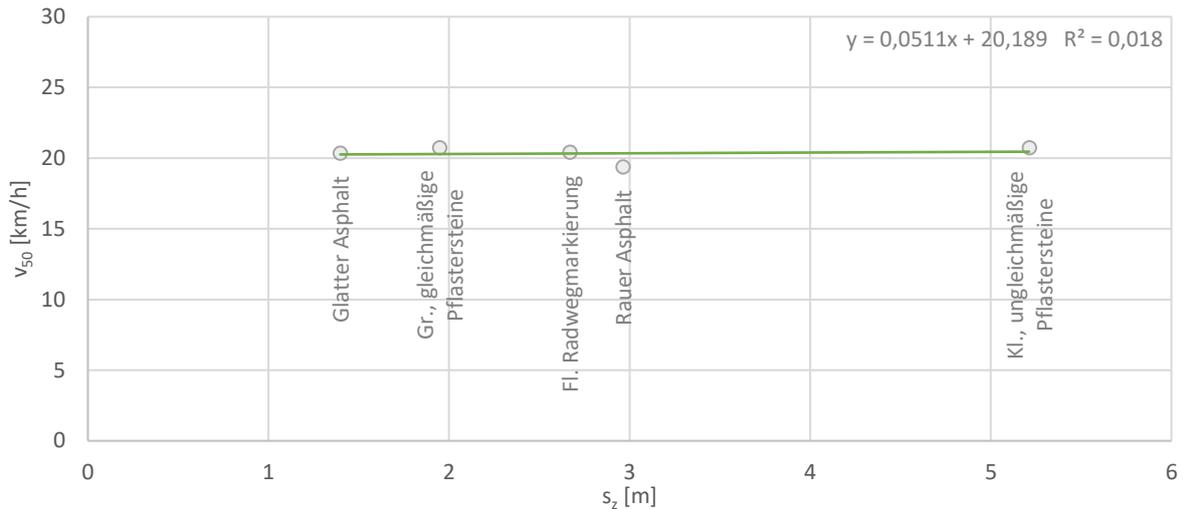


Abb. 72: Gegenüberstellung der in 50 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeit v_{50} und der zufolge Vibrationen zurückgelegten Entfernung s_z – nach Fahrbahnoberflächen (grau) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün) ohne Berücksichtigung der Ausreißer

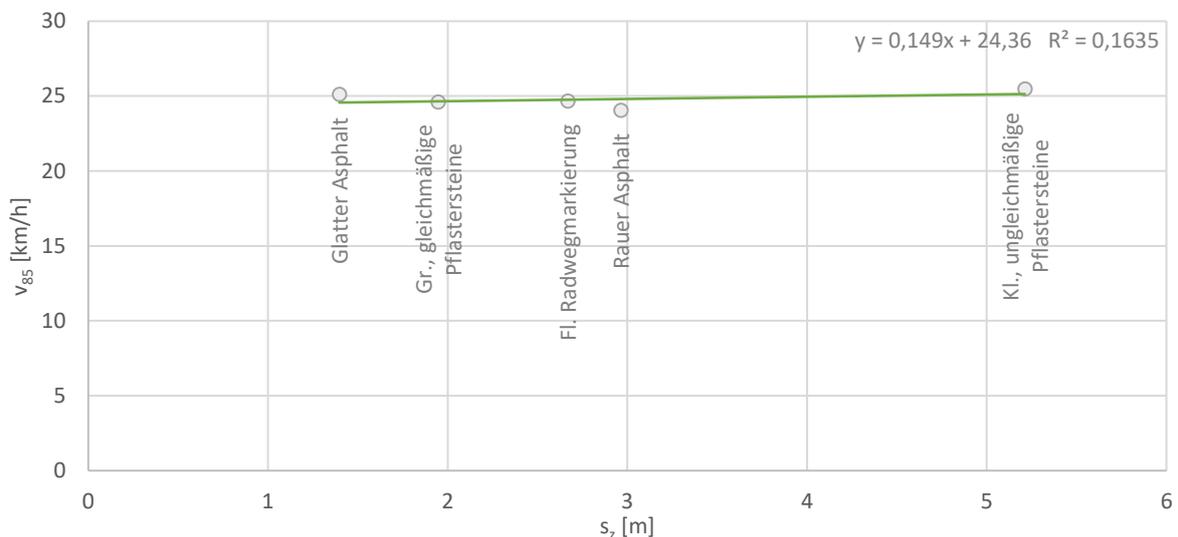


Abb. 73: Gegenüberstellung der in 85 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeit v_{85} und der zufolge Vibrationen zurückgelegten Entfernung s_z – nach Fahrbahnoberflächen (grau) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün) ohne Berücksichtigung der Ausreißer

Das Bestimmtheitsmaß ist weiterhin sehr klein, doch die Steigung der Regressionsgerade springt ins Positive. Jedoch kann dies durch die kleine Stichprobe und durch nicht berücksichtgbare Einflüsse auf die Geschwindigkeitswahl der RadfahrerInnen erklärt werden. Diese Einflüsse (z.B. die Fitness sowie die Motivation der RadfahrerInnen) können durch reines Beobachten nicht erfasst werden, können allerdings eine starke Auswirkung auf die gewählte Geschwindigkeit haben.

Daher ist der über die Steigung der Regressionsgerade gegebene Zusammenhang zwischen Fahrbahnrauheit und gewählter Geschwindigkeit nicht genau bzw. eindeutig genug, um daraus eine seriöse Aussage abzuleiten.

7 Schlussfolgerung & Ausblick

Die vorliegende Arbeit ist durch eine hohe Anzahl an Variablen – Umgebungsbedingungen – geprägt, die einen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl der RadfahrerInnen haben. Somit war es ein Hauptbestandteil der Arbeit herauszufinden, welche Rand- bzw. Umgebungsbedingungen es zu beachten gilt und welche davon relevant sind. Konsequenterweise stellte sich dadurch die Frage, welche der relevanten Bedingungen ausgeschlossen werden können und, darauf aufbauend, welche Bedingungen in welcher Art und Weise berücksichtigt werden können.

Über die Literaturrecherche und die Umfrage wurde versucht alle wesentlichen Einflüsse zu identifizieren und diese entweder über die Standortwahl zu eliminieren oder anderweitig zu berücksichtigen. Im Wesentlichen geht aus der Umfrage hervor, dass die Art des Fahrbahnbelags im Vergleich zu allen anderen Einflüssen eine eher untergeordnete Rolle spielt, während dem Allgemeinzustand der Fahrbahn sowie den Straßeneinbauten die höchste Auswirkung auf die Geschwindigkeit von RadfahrerInnen zugeschrieben wird. Ebenso hat die Verkehrszusammensetzung einen hohen Stellenwert, wobei der reine Radverkehr favorisiert wird. Die ähnliche Bewertung des Rad-/Gehwegs, des Mehrzweckstreifens und der gemeinsamen Verkehrsführung mit motorisiertem Verkehr in **Abb. 48** zeigt eindeutig, dass der Rad-/Gehweg und der Mehrzweckstreifen nicht als praktikable Lösungen angesehen werden. Allerdings ist es vor allem in Städten, aufgrund der hoher Verbauungsdichte sehr schwierig bis unmöglich reine Radwege in Nachhinein zu projektieren, sodass die angesprochenen Radfahranlagen durchaus ihre Daseinsberechtigung haben.

Weiters wurde davon ausgegangen, dass mit den gewählten Standorten (vgl. Abschnitt 4) und dem Versuchsaufbau (vgl. Abschnitt 5) alle wesentlichen Einflüsse berücksichtigt bzw. ausgeschlossen wurden. Jedoch zeigte sich während der Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen, dass der Einfluss der unmittelbaren Umgebung der Fahrbahn bzw. der Einfluss des Erlebens dieser Umgebung während der Durchfahrt einen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl der RadfahrerInnen zu haben scheint: Dadurch, dass die Umgebung im Bereich der Betonfahrbahn im Vergleich zu den anderen Messpunkten, mit ähnlicher Rauheit, wesentlich monotoner ist, ist es für die vorbeifahrenden RadfahrerInnen nicht sehr verlockend an diesem Streckenabschnitt etwas langsamer zu fahren, wodurch sie diesen etwas länger erleben hätten können. Umgekehrt ist die Umgebung (Park / Naherholungsgebiet) im Bereich des Schotterweges durchaus lebhafter und lädt somit eher zum Verweilen ein; dies spiegelt sich in Form einer verringerten Geschwindigkeit wieder. Somit wurde auf zwei Fahrbahnen zumindest ein Einfluss nicht ausreichend berücksichtigt.

Um weitere Anhaltspunkte für die Auswertung der Messdaten zu erhalten, wurde mit Hilfe der in Abschnitt 5.2 beschriebenen und in Abschnitt 6.2 ausgewerteten Versuchsmessungen die Auswirkung der Tageszeit, des Geschlechts sowie des Fahrradtyps auf die Geschwindigkeitswahl der

RadfahrerInnen bestimmt. Demnach hat die Uhrzeit keinen bedeutenden Einfluss; hingegen haben das Geschlecht und der Fahrradtyp markante Geschwindigkeitsunterschiede verursacht. Jedoch kann der Einfluss des Geschlechts aufgrund der österreicherweit ähnlichen Verteilung zwischen den Geschlechtern vernachlässigt werden. Die Untersuchung der Fahrradtypen wurde auf die flächige Radwegmarkierung (glatt), die kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteine (regelmäßig rau) und den Schotterweg (unregelmäßig rau) beschränkt. Die Auswertung dieser Messungen hat ergeben, dass Rennräder gefolgt von Mountainbikes und Straßenrädern auf den genannten Fahrbahnen am schnellsten sind. Anhand der Summenhäufigkeitsverteilungen (siehe **Abb. 61**, **Abb. 65** und **Abb. 66**) konnte gezeigt werden, dass die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Fahrradtypen durchaus von der Fahrbahnoberfläche abhängig sind: Je rauer und unregelmäßiger die Fahrbahn ist, umso geringer werden die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrradtypen.

Die Auswertung aller Geschwindigkeitsmessung aus Abschnitt 6.3 ergibt, dass, mit Ausnahme der Ausreißer Betonfahrbahn ($v_{50} = 23,7$ km/h, $v_{85} = 29,8$ km/h) und Schotterweg ($v_{50} = 17,4$ km/h, $v_{85} = 21,5$ km/h), die einzelnen 50 %- bzw. 85 %-Quantile der Geschwindigkeiten dicht gedrängt zwischen 19,4 und 20,7 km/h (dies entspricht einer Differenz von $\sim 7\%$) bzw. zwischen 23 und 25,5 km/h (dies entspricht einem Unterschied von $\sim 11\%$) liegen. Die Differenzen erscheinen nicht sehr hoch, sind bei Betrachtung der Bremswege jedoch bedeutend, da sich dieser überproportional vergrößert: von 8,7 auf 9,6 m (Differenz von $\sim 10\%$ bei Betrachtung von v_{50}) und von 11,2 auf 13 m (Differenz von $\sim 16\%$ bei Betrachtung von v_{85}).

Mit Hilfe der Messung und Auswertung der Beschleunigungen, die während dem Befahren der verschiedenen Oberflächen auf den/die Radfahrer/Radfahrerin wirken, konnte eine Rangfolge der verschiedenen Fahrbahnoberflächen ermittelt werden (siehe **Abb. 69** auf S. 75). Diese zeigt einerseits, dass zwischen der Rauheit der glattesten (glatter Asphalt) und rauesten (kleine, ungleichmäßige Pflastersteine) Fahrbahn ungefähr der Faktor 3,7 liegt und andererseits, dass glatte Asphaltoberflächen, Betonoberflächen und große, gleichmäßige Pflastersteine durchaus vergleichbar glatt sind. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass das während den Beschleunigungsmessungen verwendete Fahrrad nicht näher in die Auswertung miteinbezogen wurde, sodass der Anteil des Einflusses des Fahrrades selbst und der Anteil des Fahrbahneinflusses nicht quantifiziert werden können. Allerdings ist die Vergleichbarkeit durch die Verwendung des gleichen Fahrrades auf allen Fahrbahnoberflächen für den Zweck der vorliegenden Arbeit gegeben.

Bezüglich des Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und Leistung erscheint es auf den ersten Blick nachvollziehbar, dass jeder/jede RadfahrerIn ein persönliches Leistungsmaximum erreicht und abhängig von den, sich aus den Umgebungsbedingungen (Fahrbahnrauheit, Reifendruck, Gegenwind, usw.) ergebenden, Widerständen auch die der Leistung entsprechende Geschwindigkeit. Unter

Anbetracht der Auswertungsergebnisse scheint die Geschwindigkeit jedoch viel mehr von der Motivation bzw. vom Wegezweck als von der Fahrbahnrauheit abzuhängen, da die auf den einzelnen Fahrbahnoberflächen ermittelten 50 %-Quantile der Geschwindigkeiten v_{50} nicht bedeutend voneinander abweichen. Dies weist darauf hin, dass unabhängig von den Fahrbahnverhältnissen ein gewisser Leistungsaufwand bzw. ein gewisser Grad an Unbehagen in Kauf genommen wird, um das angestrebte Ziel in einer bestimmten Zeit zu erreichen. Diese These wird auch durch die Regressionsgeraden in **Abb. 72** und **Abb. 73** aus Abschnitt 6.5 unterstützt. Letztlich muss gesagt werden, dass die Motivation, die Fitness, das Alter des/der Radfahrers/Radfahrerin und eventuell andere unbekannte Faktoren den Einfluss der Fahrbahnoberfläche auf die Geschwindigkeitswahl von RadfahrerInnen in einem solchen Ausmaß überwiegen könnten, sodass letzterer über die alleinige Messung der Fahrgeschwindigkeiten bzw. durch reines Beobachten von außen, womöglich nicht ausreichend genau bewertet werden kann.

Ein möglicher Versuchsaufbau mit dessen Hilfe die oben genannten Einflüsse berücksichtigt werden können wäre das Messen der Geschwindigkeiten von einer oder mehreren eigens dafür zusammengestellten Versuchsgruppen beim Befahren der verschiedenen Oberflächen. Hierbei könnten auch verschiedene Fahrradtypen und Bereifungen verglichen werden. Bezüglich der zukünftigen Gestaltung von Begegnungszonen ist es sicherlich von Interesse wie die einzelnen Parameter (Länge, Breite, Fugenbreite und Oberflächenbeschaffenheit) von Pflastersteinen gewählt werden müssten, um die niedrigsten bzw. höchsten Beschleunigungen während der Überfahrt hervorzurufen. Für die Oberflächengestaltung von Radwegen wäre das Untersuchen von alternativen Belägen, wie etwa „TerraWay“ und „Stabilizer“, sinnvoll, da diese im Vergleich zu Asphalt Wasser besser abführen und somit das Radfahren auch bei Regen attraktiver machen könnten.

Das Ergebnis dieser Arbeit zeigt, bedingt durch die Vielzahl an teilweise nicht oder nur schwer erfassbaren Einflüssen, die Komplexität dieser Thematik auf und bestätigt, dass noch weiterer Forschungsbedarf in diesem Bereich besteht.

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wie hat sich die Situation für das Radfahren in den letzten Jahren verändert? – nach Alter (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009).....	12
Abb. 2: Wie hat sich die Situation für das Radfahren in den letzten Jahren verändert? – nach Ortsgröße (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009).....	13
Abb. 3: Wie verkehrssicher fühlen Sie sich beim Radfahren? – nach Alter (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009).....	13
Abb. 4: Wie verkehrssicher fühlen Sie sich beim Radfahren? – nach Ortsgröße (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)	13
Abb. 5: Anzahl der bei Unfällen verletzten und getöteten RadfahrerInnen in den Jahren 2002 - 2015 (Quelle: STATISTIK AUSTRIA, 2016)	14
Abb. 6: Welche Wege im Alltag fahren Sie zumindest gelegentlich bis zum Ziel mit dem Fahrrad? – nach Alter (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013).....	14
Abb. 7: Welche Wege im Alltag fahren Sie zumindest gelegentlich bis zum Ziel mit dem Fahrrad? – nach Urbanisierungsgrad (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)	15
Abb. 8: Welche Wege im Alltag fahren Sie zumindest gelegentlich bis zum Ziel mit dem Fahrrad? – nach Mobilitätstyp (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013).....	15
Abb. 9: Wie viele Fahrräder besitzen Sie? – nach Alter (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009).....	16
Abb. 10: Wie viele funktionstüchtige Fahrräder besitzen Sie? – nach Alter (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)	16
Abb. 11: Wie viele Fahrräder besitzen Sie? – nach Ortsgröße (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009).....	16
Abb. 12: Wie viele funktionstüchtige Fahrräder besitzen Sie? – nach Urbanisierungsgrad (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013)	17
Abb. 13: Gibt es in Ihrer Umgebung ausreichend Fahrradabstellanlagen? – nach Ortsgröße (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut, 2009)	17
Abb. 14: Gibt es in Ihrem Wohnhaus ausreichend Fahrradabstellanlagen? – nach Urbanisierungsgrad (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Hacker, et al., 2013).....	18
Abb. 15: Radwegenetzlänge pro Fläche und Einwohner – nach Bundesländern (Quelle: eigene Darstellung nach BMVIT, 2013).....	18

Abb. 16: Summenhäufigkeitsverteilung der gemessenen Geschwindigkeiten nach Geschlecht aus dem Jahr 1990 – Männer (rot) Frauen (blau) (Quelle: ClaimMS GmbH, 2011).....	19
Abb. 17: Gängige Rahmengenometrie eines Cityrades [cm] (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013)	21
Abb. 18: Gängige Rahmengenometrie eines Trekkingrades [cm] (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013).....	22
Abb. 19: Gängige Rahmengenometrie eines Reiserades [cm] (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013)	23
Abb. 20: Gängige Rahmengenometrie eines Rennrades [cm] (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013)	24
Abb. 21: Gängige Rahmengenometrie eines Mountainbikes [cm] (Quelle: Barzel, et al., 1. Auflage 2008 zitiert nach BMVIT, 2013).....	24
Abb. 22: Typische Felgenprofile von Schlauchreifenfelgen (links) und Drahtreifenfelgen (rechts) mit eingezeichneten Ausnehmungen zur Fixierung der Speichen	26
Abb. 23: Gängige Reifenprofile von links nach rechts: Slick Reifen, Straßenreifen, Schulterstollenreifen, Tourenreifen, Geländereifen, Ballonreifen und Spikereifen (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Ralf Bohle GmbH, 2016)	27
Abb. 24: Schematisches Fahrrad mit einwirkenden Kräften (grün), Auflager- und Abrollwiderstandskräften (rot) (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)	28
Abb. 25: Zusammenhang zwischen der Reibungszahl μ und dem Schlupf s (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)	30
Abb. 26: Vergleich der Verläufe der erforderlichen Leistung zur Überwindung des Rollreibungswiderstandes (blau), des Luftwiderstandes (grau), des translatorischen Beschleunigungswiderstandes (gelb) sowie des Steigwiderstandes (grün) bei konstanter Beschleunigung (1 m/s^2), konstanter Steigung (5 %), Windstille und steigender Geschwindigkeit	33
Abb. 27: Verläufe der maximal erreichbaren Fahrgeschwindigkeit mit einer Dauerleistung P_D von 120 W, durchschnittlichem Gesamtgewicht von 90kg und aufrechter Sitzposition unter Berücksichtigung der Steigung sowie der Gegen- (orange) und Rückenwindgeschwindigkeiten [km/h] (grün).....	33
Abb. 28: Darstellung der Vorderradachsen und der wirkenden Geschwindigkeiten (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010).....	34
Abb. 29: Vorderrad mit Lenker, eingezeichnetem Achsen, Versatz v , Nachlauf n und Lenkkopfwinkel δ (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)	36

Abb. 30: Vorderrad in ursprünglicher (grau) sowie ausgelenkter (schwarz) Position mit den wirkenden Kräften (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Gressmann, 11. Auflage 2010)	36
Abb. 31: Heatmap der Stadt Wien (Quelle: Kulhanek, 2016; Strava Inc., 2016).....	40
Abb. 32: Links: Messpunkt an der Argentinierstraße (48°11'42.3"N 16°22'23.6"E) mit eingezeichneten Radwegen (rot) (Quelle: Stadt Wien, 2016) Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme).....	42
Abb. 33: Links: Messpunkt an der Prater Hauptallee (48°12'31.9"N 16°24'28.8"E) mit eingezeichneten Radwegen (rot) und Radrouten (blau) (Quelle: Stadt Wien, 2016) Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)	43
Abb. 34: Links: Messpunkt am Ringradweg (48°12'29.7"N 16°21'37.1"E) mit eingezeichneten Radwegen (rot) und Radrouten (blau) (Quelle: Stadt Wien, 2016) Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)	44
Abb. 35: Links: Messpunkt am Wienflussradweg (48°11'41.6"N 16°15'50.5"E) mit eingezeichneten Radwegen (rot) und Radrouten (blau) (Quelle: Stadt Wien, 2016) Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme)	45
Abb. 36: Links: Messpunkt an der Mariahilfer Straße (48°11'49.1"N 16°20'42.7"E) mit eingezeichneten Radwegen (rot) (Quelle: Stadt Wien, 2016) Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme).....	46
Abb. 37: Links: Messpunkt am Donaukanalradweg (48°12'46.9"N 16°23'25.6"E) mit eingezeichneten Radwegen (rot) (Quelle: Stadt Wien, 2016) Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme).....	47
Abb. 38: Links: Messpunkt an der Jesuitenwiese (48°12'19.6"N 16°24'14.3"E) mit eingezeichneten Radwegen (rot) (Quelle: Stadt Wien, 2016) Rechts: Nahaufnahme der Fahrbahn (Quelle: eigene Aufnahme).....	48
Abb. 39: Nahaufnahme der Halterung „Quad Lock“ mit angebrachtem Mobiltelefon (Quelle: eigene Aufnahme).....	52
Abb. 40: Versuchsfahrrad des Modells „Fun Spirit“ der Marke KTM mit Rahmengröße 60 und 28 Zoll „Tyrago“ Tourenreifen von Schwalbe (Quelle: eigene Aufnahme).....	53
Abb. 41: Links: Alterspyramide der UmfrageteilnehmerInnen, Männer (blau), Frauen (rot) – n = 261 Rechts: Anzahl der UmfrageteilnehmerInnen pro Bundesland – n = 261.....	54
Abb. 42: Fragen 23 - 24: Bitte bewerten Sie die Auswirkung der folgenden EINFLÜSSE AUF IHRE GESCHWINDIGKEIT während dem Fahrradfahren. 0 – Keine Auswirkung, 1 – Eher negative Auswirkung, 2 – Negative Auswirkung, 3 – Eher sehr negative Auswirkung, 4 – Sehr negative Auswirkung – n = 216	55

Abb. 43: Fragen 20 - 22: Welche Fahrbahnoberfläche bevorzugen Sie, wenn es darum geht so SCHNELL SICHER KOMFORTABEL wie möglich ans Ziel zu kommen? – Jeweilige Reihung (grau), durchschnittliche Reihung (grün) mit zugehöriger Standardabweichung – n = 207-214	56
Abb. 44: Frage 16: Welche Reifen verwenden Sie? – n = 237	57
Abb. 45: Frage 18: Wie oft warten Sie bzw. eine von Ihnen beauftragte Fachkraft die einzelnen Bestandteile Ihrer Räder? 1 – Vor jeder Fahrt, 2 – Wöchentlich, 3 – Monatlich, 4 – Seltener als Monatlich, 5 – Jährlich, 6 – Nie – n = 237.....	58
Abb. 46: Frage 19: Wie überprüfen Sie den Reifendruck? – n = 236.....	58
Abb. 47: Frage 17: Bitte geben Sie, falls Ihnen gerade bekannt, den Reifendurchmesser Ihres meistbenützten Fahrrades in Zoll an. – n = 180	58
Abb. 48: Frage 25: Bitte bewerten Sie die einzelnen Möglichkeiten der Radweganordnung. – Durchschnittliche Reihung mit zugehöriger Standardabweichung – n = 216.....	59
Abb. 49: Frage 12: Was würde Ihrer Meinung nach den Radverkehr fördern? 0 – Fördert ihn nicht, 1 – Fördert ihn eher, 2 – Fördert ihn, 3 – Fördert ihn eher sehr, 4 – Fördert ihn sehr; Gewichtung von 0-1 – n = 241	59
Abb. 50: Frage 13: Wie zufrieden sind Sie mit den einzelnen Bestandteilen der bestehenden Radinfrastruktur? 1 – Sehr zufrieden, 2 – Zufrieden, 3 – Eher zufrieden, 4 – Eher unzufrieden, 5 – Unzufrieden, 6 – Sehr unzufrieden – n = 240.....	60
Abb. 51: Frage 4: Wie viele Einwohner hat der Ort bzw. die Stadt in dem/der Sie leben? – n = 261 ..	60
Abb. 52: Frage 5: Welches Fortbewegungsmittel bevorzugen Sie? – Durchschnittliche Reihung mit zugehöriger Standardabweichung – n = 261.....	61
Abb. 53: Frage 6: Wie viele funktionstüchtige Fahrräder welcher Art besitzen Sie? Links: Nach Anzahl pro Person Rechts: Gesamtanzahl nach Fahrradtyp – n = 261.....	61
Abb. 54: Links: Frage 7: Wie oft fahren Sie mit dem Fahrrad? – n = 251 Rechts: Frage 8: Wie oft benützen Sie Leihfahrräder von Bikesharing-Diensten wie z.B. Citybike in Wien? – n = 250.....	62
Abb. 55: Frage 9: Was ist Ihre Motivation zum Fahrradfahren? – Angabe auf einer Skala von 0 (= Freizeitbeschäftigung / Sport) bis 100 (= Reines Fortbewegungsmittel) (grau); gewichteter arithmetischer Mittelwert (grün) – n = 253	62
Abb. 56: Frage 10: Welche Alltagswege fahren Sie mit dem Fahrrad zumindest gelegentlich bis zum Ziel? – n = 249.....	63
Abb. 57: Frage 14: Wie hat sich die Situation für das Radfahren in den letzten Jahren verändert? – n = 240.....	63
Abb. 58: Frage 15: Wie verkehrssicher fühlen Sie sich beim Radfahren? – n = 239.....	63

Abb. 59: Summenhäufigkeitsverteilung der auf kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen gemessenen Geschwindigkeiten nach Uhrzeit – 07:00 - 10:00 (grün), 10:00 - 16:00 (schwarz), 16:00 - 19:00 (orange)	64
Abb. 60: Summenhäufigkeitsverteilung der auf kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen gemessenen Geschwindigkeiten nach Geschlecht – Männer (blau) Frauen (rot)	65
Abb. 61: Summenhäufigkeitsverteilung der auf kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen gemessenen Geschwindigkeiten nach Fahrradtyp – Straßenräder (orange) Mountainbikes (schwarz) Rennräder (grün)	66
Abb. 62: Summenhäufigkeitsverteilung aller gemessenen Geschwindigkeiten nach Fahrbahnoberfläche – Schotter inkl. generierter Daten (gelb), Rauer Asphalt (rot), Schotter (orange), Kleine, ungleichmäßige Pflastersteine (dunkelblau), Flächige Radwegmarkierung (grün), Glatte Asphalt (dunkelgrau), Große, gleichmäßige Pflastersteine (hellblau), Beton (violett)	68
Abb. 63: Zusammenhang zwischen Bremsweg und Geschwindigkeit (grün) mit eingezeichneten Geschwindigkeiten (v_{50}) pro Fahrbahnoberfläche (grau).....	69
Abb. 64: Zusammenhang zwischen Bremsweg und Geschwindigkeit (grün) mit eingezeichneten Geschwindigkeiten (v_{85}) pro Fahrbahnoberfläche (grau).....	70
Abb. 65: Summenhäufigkeitsverteilung der auf Schotterwegen gemessenen Geschwindigkeiten nach Fahrradtyp – Straßenräder (orange) Mountainbikes (Schwarz) Rennräder (grün).....	72
Abb. 66: Summenhäufigkeitsverteilung der auf flächiger Radwegmarkierung gemessenen Geschwindigkeiten nach Fahrradtyp – Citybikes (rot), Hollandräder (hellblau), Straßenräder (orange), Mountainbikes (schwarz), Rennräder (grün)	72
Abb. 67: Steigung k der Regressionsgeraden für die Punktwolken der x- (grün), y- (orange) und z-Achse (grau) (Scatterplots siehe Anhang).....	74
Abb. 68: Bestimmtheitsmaß R^2 der Regressionsgeraden für die Punktwolken der x- (grün), y- (orange) und z-Achse (grau) (Scatterplots siehe Anhang)	75
Abb. 69: Auf verschiedenen Oberflächen pro Minute zurückgelegte Entfernung in z-Richtung mit weicher (grün) und starrer (orange) Feder	75
Abb. 70: Gegenüberstellung der in 50 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeit v_{50} und der zufolge Vibrationen zurückgelegten Entfernung s_z – nach Fahrbahnoberflächen (grau) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün).....	77
Abb. 71: Gegenüberstellung der in 85 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeit v_{85} und der zufolge Vibrationen zurückgelegten Entfernung s_z – nach Fahrbahnoberflächen (grau) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün).....	77

Abb. 72: Gegenüberstellung der in 50 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeit v_{50} und der zufolge Vibrationen zurückgelegten Entfernung s_z – nach Fahrbahnoberflächen (grau) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün) ohne Berücksichtigung der Ausreißer 78

Abb. 73: Gegenüberstellung der in 85 % der Fälle erreichten maximalen Geschwindigkeit v_{85} und der zufolge Vibrationen zurückgelegten Entfernung s_z – nach Fahrbahnoberflächen (grau) mit zugehöriger Regressionsgerade (grün) ohne Berücksichtigung der Ausreißer 78

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ausgewertete Nutzerdaten der Anwendung „Bike Citizens Fahrrad Navi GPS“ der Städte Wien, Graz, Linz und Salzburg (Quelle: Kulhanek, 2016).....	19
Tab. 2: Luftwiderstandsbeiwerte c_w von ausgewählten Fahrrädern (Quelle: Gressmann, 11. Auflage 2010).....	32
Tab. 3: Übersicht der eingehaltenen Kriterien aller Messpunkte bzw. Standorte	41
Tab. 4: Auswertungsergebnis der Vergleichsmessungen auf kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen nach Zeitraum und Geschlecht.....	64
Tab. 5: Auswertungsergebnis der Vergleichsmessungen nach Fahrradtyp sowie Gesamt	65
Tab. 6: Auswertungsergebnis aller Geschwindigkeitsmessungen	68
Tab. 7: Auswertungsergebnis aller Geschwindigkeitsmessungen	69
Tab. 8: Anzahl der gemessenen RadfahrerInnen nach Fahrradtyp auf flächiger Radwegmarkierung, Schotter und kleinen, ungleichmäßigen Pflastersteinen	71
Tab. 9: Die in 50% der Fälle zu erwartende maximale Geschwindigkeit nach Fahrbahnoberfläche und Fahrradtyp	71
Tab. 10: Die in 85% der Fälle zu erwartende maximale Geschwindigkeit nach Fahrbahnoberfläche und Fahrradtyp	72

10 Literaturverzeichnis

Außerdorfer, Michael und Thomann, Laura. 2016. <https://fh-joanneum.at/>. [Online] FH Joanneum, 12. April 2016. [Zitat vom: 10. Jänner 2016.] <https://fh-joanneum.at/blog/mit-der-shique-app-auf-besseren-wegen/>.

Barzel, Peter, Bollschweiler, Michael und Smolik, Christian. 1. Auflage 2008. *Die neue Fahrradtechnik*. Bielefeld : Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, 1. Auflage 2008.

Bundesanstalt für Verkehr; Bundesanstalt Statistik Österreich. 2009. *Straßenverkehrsunfälle – Österreich: Basic Fact Sheet 2009 - Radfahrer*. Wien : s.n., 2009.

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. 2013. *Radverkehr in Zahlen - Daten, Fakten und Stimmung*. Wien : Ueberreuter Print GmbH, 2013.

ClaimMS GmbH. 2011. <https://www.colliseum.net>. [Online] 12. Dezember 2011. [Zitat vom: 10. Jänner 2017.] https://www.colliseum.net/wiki/Geschwindigkeit_von_Radfahrern_im_Stadtverkehr.

Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. New York : United Nations, 2015. ST/ESA/SER.A/366.

Gressmann, M. 11. Auflage 2010. *Fahrradphysik und Biomechanik*. Kiel : Moby Dick Verlag, 11. Auflage 2010.

Hacker, Evelyn und Hofinger, Christoph. 2013. *Mobilitätsverhalten und Mobilitätstypen in Österreich - Executive Summary*. [Hrsg.] SORA - Institute for Social Research and Consulting. Wien : s.n., 2013.

Karmasin Marktforschung, Österreichisches Gallup-Institut. 2009. *Radverkehr und Klimaschutz*. Wien : s.n., 2009.

Kulhanek, Lukas. 2016. *Re: Masterarbeit / Heatmap Wien [Helpdesk #67611]*. Graz : BikeCityGuide Apps GmbH, 2016.

Mobilitätsagentur Wien GmbH. 2016. *Fahrrad Report Wien 2016*. Wien : Mobilitätsagentur Wien GmbH, 2016.

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr. 2014. *RVS 03.02.13 Radverkehr*. Wien : s.n., 2014.

Ralf Bohle GmbH. 2016. <http://www.schwalbe.com>. [Online] 2016. [Zitat vom: 10. Jänner 2017.] <http://www.schwalbe.com/de/>.

—. **2016.** <http://www.schwalbe.com/>. [Online] 2016. [Zitat vom: 10. Jänner 2017.] <http://www.schwalbe.com/de/luftdruck.html>.

Rau, Hartmunt und Leser, Hansjörg. 1990. Geschwindigkeit von Radfahrern im Stadtverkehr. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 28. 1990, S. 176-178 (Heft 7/8).

Senkel, Thomas. 1993. Plädoyer für einen guten Reifen. *Pro Velo* 32. 1993.

Stabilizer 2000 GmbH. stabilizer2000.com/. [Online] [Zitat vom: 10. Jänner 2017.] stabilizer2000.com/.

Stadt Wien. 2016. <https://www.wien.gv.at/>. [Online] Stadt Wien, 2016. [Zitat vom: 7. November 2016.] <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/wind-monat.html>.

—. **2016.** <https://www.wien.gv.at/>. [Online] Stadt Wien, 2016. [Zitat vom: 10. Jänner 2017.] <https://www.wien.gv.at/stadtplan/>.

Stadtentwicklung Wien, Magistratsabteilung 18: Stadtentwicklung und Stadtplanung. 2010. *Radverkehrserhebung Wien - Entwicklungen, Merkmale und Potenziale; Werkstattbericht Nr. 114.* Wien : s.n., 2010.

Stadtentwicklung Wien, Magistratsabteilung 18: Stadtentwicklung und Stadtplanung, [Hrsg.]. 2014. STEP 2025: Fachkonzept Mobilität. Wien : Paul Gerin GmbH & Co KG, 2014.

—. **2014.** STEP 2025: Stadtentwicklungsplan Wien. Wien : AV + Astoria Druckzentrum GmbH, 2014.

STATISTIK AUSTRIA. 2016. <http://www.statistik.at>. [Online] 22. Juni 2016. [Zitat vom: 10. Jänner 2017.] http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/gesundheit/unfaelle/strassenverkehrsunfaelle/019874.html.

Steinbauer Development GmbH. <http://www.terraway.info/>. [Online] [Zitat vom: 10. Jänner 2017.] <http://www.terraway.info/>.

Strava Inc. 2016. <http://labs.strava.com>. [Online] 2016. [Zitat vom: 10. Jänner 2017.] <http://labs.strava.com/heatmap/#12/16.37718/48.19916/yellow/bike>.

11 Anhang

Datenerhebung für Masterarbeit

Sehr geehrte Damen und Herren,

mein Name ist Marko Toljić und ich beschäftige mich im Zuge meiner Masterarbeit mit dem Thema "Der Einfluss der Fahrbahnoberfläche auf die Geschwindigkeit von Radfahrern" im Masterstudiengang Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Wien. Diese Umfrage soll eine (aktuellere) Datengrundlage zu den Themengebieten Fahrradnutzung, Fahrradtechnik und Fahrbahneigenschaften schaffen, besteht aus 25 Fragen und der Zeitaufwand zum Ausfüllen des Fragebogens beträgt ca. 10-15 Minuten.

Wenn Sie kein Fahrrad besitzen und keine Bikesharing-Dienste (z.B. Citybike in Wien) verwenden nehmen Sie an der Umfrage bitte NICHT teil.

Die Daten bzw. das Resultat sind natürlich vollkommen anonymisiert und können bei Interesse ab dem 30.11.2016 per E-Mail (0926905@student.tuwien.ac.at) angefordert werden.

Vielen Dank für die Teilnahme!

Demographische und allgemeine Angaben

Die nun folgend angefragten demographischen Angaben werden ausschließlich für die statistische Auswertung verwendet und lassen keinen Rückschluss auf einzelne Personen zu.

1. **Alter *** 

2. **Geschlecht ***

Männlich

Weiblich

3. **In welchem Bundesland wohnen Sie? (Hauptwohnsitz) ***

4. **Wie viele Einwohner hat der Ort bzw. die Stadt in dem/der Sie leben? ***

5. **Welches Fortbewegungsmittel bevorzugen Sie? ***

Bitte geben Sie eine Reihung an.

▲ ▼ Bus

▲ ▼ Auto

▲ ▼ U-Bahn

▲ ▼ Moped / Motorrad

▲ ▼ Bahn

▲ ▼ zu Fuß

▲ ▼ Fahrrad

6. **Wie viele funktionstüchtige Fahrräder welcher Art besitzen Sie? ***

Bitte geben Sie die entsprechende Anzahl im Kästchen auf der rechten Seite an. Falls Sie kein Fahrrad eines bestimmten Typs besitzen geben Sie bitte 0 ein.

Cityrad

Trekkingrad

Reiserad

Rennrad

Mountainbike

Fahrradnutzung

7. Wie oft fahren Sie mit dem Fahrrad?

8. Wie oft benutzen Sie Leihfahrräder von Bikesharing-Diensten wie z.B. Citybike in Wien?

9. Was ist Ihre Motivation zum Fahrradfahren?

Bitte geben Sie an wie stark Sie zu einer der zwei Motivationen tendieren. Der Schieber muss dabei NICHT ganz an das Ende der jeweiligen Motivation geschoben werden.

Freizeitbeschäftigung / Sport Reines Fortbewegungsmittel

10. Welche Alltagswege fahren Sie mit dem Fahrrad zumindest gelegentlich bis zum Ziel?

Mehrfachauswahl möglich!

- Weg zur Arbeit
- Weg zu Schule / Ausbildung
- Dienstliche / geschäftliche Erledigungen
- Einkauf
- Freizeit
- Sport
- Sonstiges

11. Sind Sie der Meinung, dass der Radverkehr weiterhin gefördert werden sollte? *

ja

nein

Radverkehrsförderung

12. Was würde Ihrer Meinung nach den Radverkehr fördern?

Mit der Gewichtung (++) wichtig bis -- unwichtig) geben Sie an wie wichtig das jeweilige Kriterium im Vergleich zu den anderen für Sie ist.

	Fördert ihn					k.A.	Gewichtung				
	nicht	eher	Fördert ihn	eher sehr	sehr		--	-	+	++	
Verkehrliche Trennung von motorisiertem Verkehr	<input type="radio"/>										
Verkehrliche Trennung von Fußgängern	<input type="radio"/>										
Bevorzugung bei Verkehrslichtsignalanlagen	<input type="radio"/>										
Anderer Fahrbahnbelag	<input type="radio"/>										
Mehr Abstellanlagen	<input type="radio"/>										
Sicherere Abstellanlagen	<input type="radio"/>										

Verkehrssicherheit

13. Wie zufrieden sind Sie mit den einzelnen Bestandteilen der bestehenden Radinfrastruktur?

	Sehr zufrieden	Zufrieden	Eher zufrieden	Eher unzufrieden	Unzufrieden	Sehr unzufrieden	k.A.
Sicherheit der Abstellanlagen	<input type="radio"/>						
Anzahl der Abstellanlagen	<input type="radio"/>						
Anzahl der Radwege	<input type="radio"/>						
Art der Wege (Mehrzweckstreifen, Radfahrstreifen, usw...)	<input type="radio"/>						
Zustand der Wege (Risse, Schlaglöcher, uws...)	<input type="radio"/>						
Beschilderung	<input type="radio"/>						
Lesbarkeit bzw. Verständlichkeit der Beschilderung	<input type="radio"/>						

14. Wie hat sich die Situation für das Radfahren in den letzten Jahren verändert?

15. Wie verkehrssicher fühlen Sie sich beim Radfahren?

Fahrradtechnik und Wartung

Reifenart / Profil



Reifenarten bzw. Profile von links nach rechts:
Slickreifen, Straßenreifen, Schulterstollenreifen, Tourenreifen, Geländereifen, Balloonreifen, Spikereifen

16. Welche Reifen verwenden Sie?

Mehrfachauswahl möglich!

- Slickreifen
- Straßenreifen
- Schulterstollenreifen
- Tourenreifen
- Geländereifen
- Balloonreifen
- Spikereifen

17. Bitte geben Sie, falls Ihnen gerade bekannt, den Reifendurchmesser Ihres meistbenützten Fahrrades in Zoll an. 

18. Wie oft warten Sie bzw. eine von Ihnen beauftragte Fachkraft die einzelnen Bestandteile Ihrer Räder?

	Vor jeder Fahrt	Wöchentlich	Monatlich	Seltener als Monatlich	Jährlich	Nie	k.A.
Überprüfung des Reifendrucks	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schmieren bzw. Nachfetten von beweglichen Teilen (Kette, Lager, usw...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überprüfung der Bremsen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überprüfung der Schaltung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überprüfung der Beleuchtungsanlage	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zentrieren der Laufräder	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Überprüfung des Lenkers	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nachziehen aller Schrauben	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

19. Wie überprüfen Sie den Reifendruck?

Fahrbahn

Fahrbahnoberflächen



Von Links nach Rechts: Asphalt | Beton | Große Pflastersteine | Kleine Pflastersteine



Von Links nach Rechts: Flächige Radwegmarkierung | "Terraway"- bzw. "Stabilizer"-Belag (gebundener Kies und Split; wasserdurchlässig und atmungsaktiv) | Schotter | Gewachsener Boden (=Erde)

20. Welche Fahrbahnoberfläche bevorzugen Sie, wenn es darum geht so SCHNELL wie möglich ans Ziel zu kommen?

Bitte geben Sie eine Reihung an.

Asphalt

Beton

Große Pflastersteine

Kleine Pflastersteine

Flächige Radwegmarkierung

"Terraway"- bzw. "Stabilizer"-Belag

Schotter

Gewachsener Boden

21. Welche Fahrbahnoberfläche bevorzugen Sie, wenn es darum geht so SICHER wie möglich ans Ziel zu kommen?

Bitte geben Sie eine Reihung an.

Asphalt

Beton

Große Pflastersteine

Kleine Pflastersteine

Flächige Radwegmarkierung

"Terraway"- bzw. "Stabilizer"-Belag

Schotter

Gewachsener Boden

22. Welche Fahrbahnoberfläche bevorzugen Sie, wenn es darum geht so KOMFORTABEL wie möglich ans Ziel zu kommen?

Bitte geben Sie eine Reihung an.

Asphalt

Beton

Große Pflastersteine

Kleine Pflastersteine

Flächige Radwegmarkierung

"Terraway"- bzw. "Stabilizer"-Belag

Schotter

Gewachsener Boden

**23. Bitte bewerten Sie die Auswirkung der folgenden EINFLÜSSE AUF IHRE GESCHWINDIGKEIT während dem Fahrradfahren.
TEIL 1 ***

	Keine Auswirkung	Eher negative Auswirkung	Negative Auswirkung	Eher sehr negative Auswirkung	Sehr negative Auswirkung	k.A.
Verschmutzung der Fahrbahn (durch Laub, Kies, usw...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Hineinhängende Vegetation	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ungünstig platzierte Schilder und Werbetafeln	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nasse Fahrbahn	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unzureichende Rauigkeit der Fahrbahn	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zu schmaler Weg	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zu kleiner Kurvenradius	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zu große Längsneigung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schlecht lesbare Bodenmarkierungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Allgemein schlechter Zustand der Fahrbahn (Risse, Unebenheiten, Schlaglöcher, usw...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Straßeneinbauten (Straßenbahngleise, Tempeschwellen, usw...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

24. Bitte bewerten Sie die Auswirkung der folgenden EINFLÜSSE AUF IHRE GESCHWINDIGKEIT während dem Fahrradfahren.
TEIL 2 *

	Keine Auswirkung	Eher negative Auswirkung	Negative Auswirkung	Eher sehr negative Auswirkung	Sehr negative Auswirkung	k.A.
FußgängerInnen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Andere RadfahrerInnen (gegen Ihre Fahrtrichtung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Andere RadfahrerInnen (gleiche Fahrtrichtung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Motorisierte VerkehrsteilnehmerInnen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ungünstiges Wetter (Wind und Regen)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unzureichende Sicherheitsausrüstung (z.B. kein Sturzhelm)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Navigieren	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Telefonieren	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Musik hören	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
(Straßen-)Lärm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

25. Bitte bewerten Sie die einzelnen Möglichkeiten der Radweganordnung.

	Sehr gute Lösung	Gute Lösung	Eher gute Lösung	Eher schlechte Lösung	Schlechte Lösung	Sehr schlechte Lösung	k.A.
Fahrradstraßen (reiner Radverkehr über die gesamte Fahrbahnbreite)	<input type="radio"/>						
Einrichtungsrادweg	<input type="radio"/>						
Zweirichtungsrادweg	<input type="radio"/>						
Rad- und Gehweg	<input type="radio"/>						
Mehrzweckstreifen (durch unterbrochene Leitlinie von motorisiertem Verkehr getrennt)	<input type="radio"/>						
Radfahrstreifen (durch Sperrlinie von motorisiertem Verkehr getrennt)	<input type="radio"/>						
Kein gesonderter Radweg (Verkehrsführung gemeinsam mit motorisiertem Verkehr)	<input type="radio"/>						

» [Umleitung auf Schlussseite von Umfrage Online](#)

