

Konnektivität der Radwegenetze und Radverkehrsanteil in deutschen Mittelstädten

Bicycle Network Connectivity and Cycling Mode Share in Medium-Sized German Cities

Sandra Roth¹

¹Stadt Nürtingen, Stabsstelle Geoinformation und Vermessung · s.roth@nuertingen.de

Zusammenfassung: Der Ausbau lückenloser und sicherer Radverkehrsnetze ist ein wichtiger Baustein zur Steigerung der Verkehrsleistung mit dem Fahrrad. Der Einfluss der Konnektivität oder der Dichte der Netze auf den Fahrradanteil am Modal Split wird jedoch unterschiedlich eingeschätzt. Deshalb wurden die Radwegenetze deutscher Städte als Graphen aufbereitet, ihre Konnektivität über Konnektivitätsindikatoren quantitativ erfasst und der Zusammenhang mit dem Fahrradanteil analysiert. Dabei wurden bis zu mittlere Korrelationen ermittelt. Die absolute Länge des Radwegenetzes und das Relief in den Stadtgebieten scheinen jedoch die Konnektivität zu beeinflussen.

Schlüsselwörter: Radwegenetz, Konnektivität, Indikatoren, Modal Split, OpenStreetMap

Abstract: *The expansion of continuous and safe bicycle networks is an important approach to increase the share of cycling in Germany. However, the influence of network connectivity on mode share is ambiguous. Therefore, the cycle ways of German cities were transformed into graphs and their connectivity was measured using several indices at the network level. Moderate correlation between indices and cycling mode share was found. Yet, the absolute length of networks and the slope of the urban areas seem to influence the connectivity.*

Keywords: *Bicycle network connectivity, indices, mode share, OpenStreetMap*

1 Einleitung

Im Jahr 2017 wurden in Deutschland durchschnittlich 120 Wege pro Person und Jahr mit einer durchschnittlichen Wegelänge von 3,7 km mit dem Fahrrad zurückgelegt. Im Jahr 2030 sollen es nach dem Nationalen Radverkehrsplan 3.0 durchschnittlich 180 Wege pro Person und Jahr mit einer durchschnittlichen Wegelänge von 6 km sein (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2021). Ein Baustein, um diese Steigerung der Verkehrsleistung mit dem Fahrrad zu erreichen, ist der Ausbau von lückenlosen und sicheren Radverkehrsnetzen. Die Erhöhung der Konnektivität des Radverkehrsnetzes wird also als ein wichtiger Faktor zur Steigerung der Mobilität mit dem Fahrrad angesehen. In der Literatur wird der Einfluss der Konnektivität oder der Dichte der Netzwerke auf den Fahrradanteil jedoch unterschiedlich eingeschätzt (z. B. Moudon et al., 2005; Lowry & Loh, 2017, Molaei, Tang & Hardie, 2021). Da sich viele Untersuchungen zum Radverkehr auf Großstädte konzentrieren (z. B. Larsen, Patterson & El-Geneidy, 2013; Abad & van der Meer, 2018) und zumindest in deutschen Großstädten der Fahrradanteil überdurchschnittlich ist (Nobis & Kuhnimhof, 2018), soll der Zusammenhang zwischen Konnektivität und Radverkehrsanteil für die deutschen Mittelstädte geprüft werden. Das sind 621 Städte und Gemeinden mit 20.000 bis 100.000 Einwohnern, in denen 27,5 % der deutschen Bevölkerung leben (nach Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2019). Zu einem Radverkehrsnetz zählen

u. a. auch Tempo-30-Straßen oder Wirtschaftswege – da es aber vor allem an Radwegen, Radfahrstreifen und Radschnellverbindungen mangelt (BMVI, 2021), soll speziell das ausgewiesene Radwegenetz untersucht werden. Dazu sollen die Radwege der Mittelstädte aus den OpenStreetMap-Daten (OSM) extrahiert, als Graphen aufbereitet und ihre Konnektivität über Konnektivitätsindikatoren quantitativ erfasst werden. Mittels einer Korrelationsanalyse sollen die Indikatoren in Zusammenhang zum Anteil des Fahrrads am Modal Split und zur Bewertung im ADFC-Fahrradklima-Test 2020, die für 522 der 621 Mittelstädte vorhanden ist, gesetzt werden.

2 Daten und Methoden

2.1 ADFC-Fahrradklima-Test 2020

Der Fahrradklimatest (FKT), der durch den Allgemeinen Deutschen Fahrrad-Club (ADFC) ca. alle zwei Jahre durchgeführt wird, ist eine nicht repräsentative Umfrage, mit der die Radfahrbedingungen in deutschen Städten und Gemeinden vergleichbar eingeschätzt werden sollen. Der Hauptfragebogen 2020 enthielt 27 Einzelfragen, die Radfahrende auf einer sechsstufigen Skala ähnlich den „Schulnoten“ von 1 bis 6 für ihre Stadt bewerten sollten. Besonders interessant sind die Fragen 3 bzw. 23 und 24, die man als „eingeschätzten“ Fahrradanteil bzw. als „eingeschätzte“ Konnektivität interpretieren kann (Tab. 1).

Tabelle 1: Ausschnitt Kategorien und Einzelfragen ADFC Fahrradklima-Test 2020 (Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club e. V. (ADFC), 2021)

Frage-Nr.	Kategorie (fett), Einzelfrage
F1 bis F5	Fahrrad- und Verkehrsklima
F1	Bei uns macht Radfahren Spaß. ... ist Radfahren Stress.
F2	Bei uns werden Radfahrer/innen als Verkehrsteilnehmer akzeptiert. ... wird man als Radfahrer/in nicht ernst genommen.
F3	Bei uns fahren alle Fahrrad – egal, ob alt oder jung. ... fahren eher nur bestimmte Gruppen Fahrrad (z. B. Kinder, Radsportler). → „eingeschätzter“ Fahrradanteil
[...]	
F23 bis F27	Infrastruktur und Radverkehrsnetz
F23	Bei uns ist das Stadtzentrum bzw. die Ortsmitte gut mit dem Fahrrad zu erreichen. ... ist das Stadtzentrum bzw. die Ortsmitte schlecht mit dem Fahrrad zu erreichen.
F24	Bei uns kann man zügig und direkt Ziele mit dem Rad erreichen. ... wird man am zügigen Fahren mit dem Rad gehindert und muss Umwege fahren.
[...]	→ „eingeschätzte“ Konnektivität

2.2 Modal Split für Mittelstädte

Mit Modal Split ist hier der prozentuale Anteil der Verkehrsmittel am Verkehrsaufkommen (zurückgelegte Wege) gemeint. Dieser wurde ausschließlich über Internet recherchiert. Aus einigen Quellen konnten Angaben für mehrere Städte deutschlandweit entnommen werden. Das sind v. a. die Forschungsprojekte „Mobilität in Städten – SrV 2013“ (20 Städte, TU

Dresden, 2016), „Mobilität in Städten – SrV 2018“ (49 Städte, TU Dresden, 2021) und „Mobilität in Deutschland – MiD 2017 – Ergebnisse der regionalstatistischen Schätzung“ (für 27 kreisfreie Städte, infas, DLR, IVT und infas 360, 2019). In fünf Bundesländern wurden alle Mittelstädte überprüft. Von diesen konnten in Sachsen-Anhalt nur für 2 von 22 Mittelstädten und in Thüringen nur für 4 von 19 Mittelstädten Angaben zum Modal Split gefunden werden. Da diese Suche sehr aufwendig ist, wurde sie nicht systematisch für alle Bundesländer weitergeführt. Insgesamt wurden für 174 der 621 Mittelstädte Modal-Split-Werte aus den Jahren 2010 bis 2019 in die Analyse aufgenommen. Der Anteil des Fahrrads am Modal Split reicht von 1,8 % bis 43 % und liegt im Mittel bei 14,7 %.

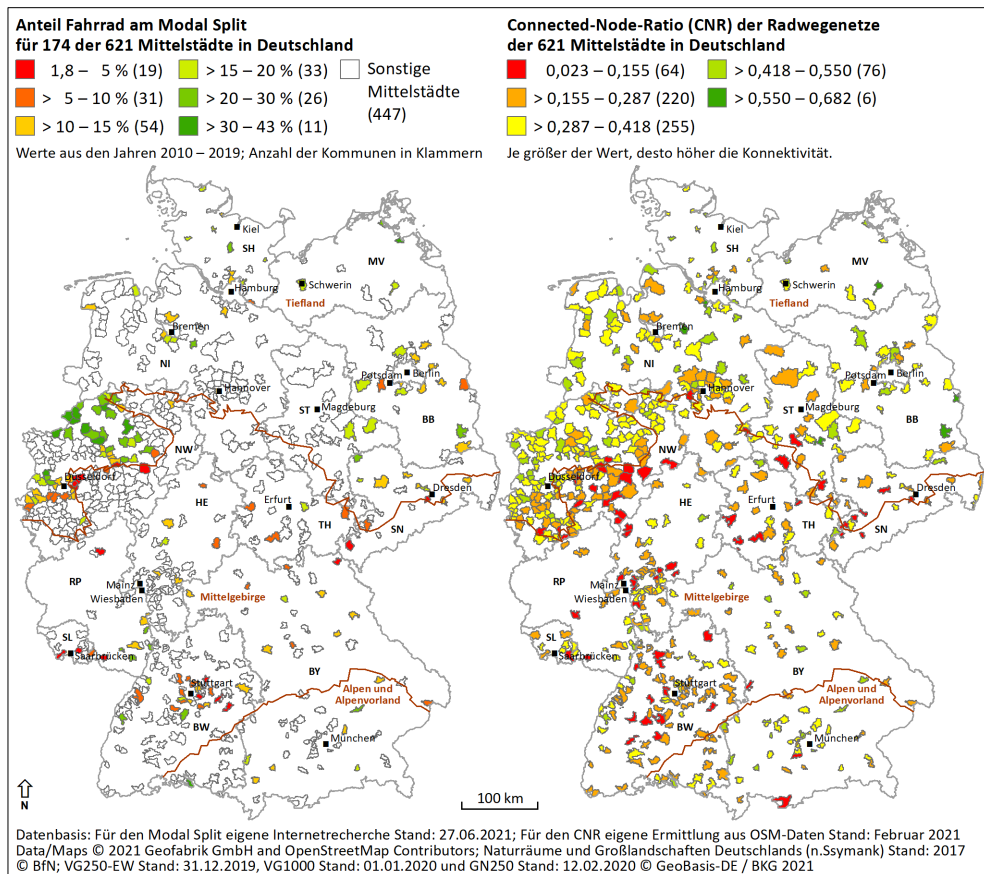


Abb. 1: Räumliche Verteilung des recherchierten Fahrradanteils und des ermittelten CNR in deutschen Mittelstädten

2.3 Radwegenetze als Graphen und Auswahl der Indikatoren

Es wurden die Daten der OpenStreetMap verwendet, da darin die Radwege nach einem empfohlenen Klassifikationsschlüssel aufgenommen werden können und sie deutschlandweit, frei verfügbar und einfach zugänglich sind. Es ist bekannt, dass die von freiwilligen Kontributor*innen erhobenen Daten hinsichtlich Vollständigkeit, räumlicher und inhaltlicher Ge-

nauigkeit und Konsistenz Limitationen haben und dass Qualitätsunterschiede nicht räumlich zufällig verteilt sind (u. a. Haklay, 2010, Minghini & Frassinelli, 2019). Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass die Radwegenetz-Daten bei den Kommunen vollständig bzw. in besserer Qualität vorliegen (vgl. auch Jilin, Navratil, Clementini & Fogliaroni, 2019). Deren Zugänglichkeit ist auch keine Alternative für eine bundesweite Untersuchung.

Die OSM-Daten wurden im Februar 2021 von Geofabrik für die Ebene der Bundesländer bzw. Regierungsbezirke als XML-Files heruntergeladen (Geofabrik GmbH and OpenStreet-Map Contributors, 2021) und mit dem „ArcGIS Editor for OSM 10.8.x Desktop“ (Moore, 2020) in einzelne ESRI-File-Geodatabases gespeichert. Über ein eigenes Python-Skript, basierend auf den Bibliotheken „ArcPy“ von ESRI, „OSMnx“ (Boeing, 2017) und „NetworkX“ (Hagberg, Swart & Schult, 2008), wurden die OSM-Linien auf das jeweilige Gemeindegebiet zugeschnitten, über SQL-Abfragen die Radwegenetz- und Straßennetz-Linien extrahiert, die Radwegenetz-Linien in Knoten-Kanten-Modelle überführt und die Indikatoren ermittelt.

Die nach Straßenverkehrsordnung (StVO) für den Radverkehr ausgewiesenen bzw. freigegebenen Wege (Radwege, Radfahrstreifen, Schutzstreifen für den Radverkehr, Busspur für den Radverkehr freigegeben, Fahrradstraße, gemeinsamer und getrennter Geh- und Radweg, Gehweg für Radfahrer freigegeben und Fußgängerzone für Radfahrer frei) können in OSM auf verschiedene Weisen abgebildet werden. Es wurde eine SQL-Abfrage zusammengestellt (Tab. 2), welche die von OSM empfohlenen bzw. üblicherweise vergebenen Schlüssel und Werte auswählt (OpenStreetMap Foundation, 2021, im Abgleich mit den Abfragen in „OSM-nx“ und „ArcGIS Editor for OSM 10.8.x Desktop“). Z. B. kann ein straßenbegleitender, räumlich getrennter Radweg als eigenständiger Weg (`highway = 'cycleway'`) oder als Eigenschaft der Straße erfasst werden (`highway = 'primary' AND cycleway = 'track'`). So eventuell doppelt erfasste Radwege können mit der Auswahl jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Treffen nur zwei Radwege-Linien aufeinander, wurden sie zu einer Kante vereint, wobei Über- und Unterführungen erhalten wurden. Die Fahrtrichtung wurde nicht berücksichtigt, da sich andeutete, dass sie aus den OSM-Daten nicht sicher einheitlich abgeleitet werden konnte und ihre Einbeziehung zugleich komplexer ist.

Tabelle 2: Abfrage der OSM-Linien für das Radwegenetz

```
(highway = 'cycleway') OR
((cycleway = 'track' OR cycleway:right = 'track' OR cycleway:left = 'track' OR cycleway:both = 'track' OR
cycleway = 'lane' OR cycleway:right = 'lane' OR cycleway:left = 'lane' OR cycleway:both = 'lane' OR
cycleway = 'shared_lane' OR cycleway:right = 'shared_lane' OR cycleway:left = 'shared_lane' OR cycleway:both =
'shared_lane' OR
bicycle:lanes like '%designated%' OR
cycleway like '%opposite%' OR
cycleway = 'share_busway' OR cycleway:right = 'share_busway' OR cycleway:left = 'share_busway' OR cycleway:both
= 'share_busway' OR
bicycle_road = 'yes') AND
highway NOT IN ('', 'proposed', 'planned', 'construction', 'raceway', 'elevator', 'escalator', 'crossing', 'corridor', 'platform',
'steps')) OR
(((bicycle = 'designated' OR bicycle = 'official' OR bicycle = 'yes') AND (highway = 'footway' OR highway = 'pedestrian')) OR
((bicycle = 'designated' OR bicycle = 'official') AND highway = 'path')
```

In der Graphentheorie gibt es eine Vielzahl von Konnektivitätsindikatoren zur Analyse der Konnektivität von Verkehrsnetzwerken, die z. B. Rodrigue (2020) und Hochmair (2020) vorstellen und u. a. Dill (2004), Tresidder (2005), Bachofer, Klett und Hochschild (2010) sowie Molaei et al. (2021) (beispielhaft) auf verschiedene Straßennetze anwenden. Bei der Auswahl der Indikatoren (Tab. 3) gilt es aber zu beachten, dass die Radwegenetze, im Gegensatz zu den Straßennetzen, lückenhaft sind und damit aus mehreren Teilgraphen bestehen werden, und die Untersuchungsgebiete unterschiedlich groß sind. Indikatoren, die sich auf die Fläche beziehen, wie die Kreuzungsdichte, bieten sich deshalb nicht an. In topologische Konnektivitätsindikatoren gehen die Anzahl Kanten, Knoten, Kreuzungen und/oder Teilgraphen ein. Sie lassen aber keine Aussage über die metrische Größe eines Netzwerkes zu. Ein Graph mit 10 Kanten oder Kreuzungen kann den gleichen Wert haben, wie ein Graph mit 1.000 Kanten oder Kreuzungen. Durch die Gewichtung der Kanten mit der realen Wegelänge bei metrischen Konnektivitätsindikatoren wird noch in der Größe des Netzes differenziert.

Tabelle 3: Ausgewählte Indikatoren (eingehende Kenngrößen: e = Anzahl Kanten, v = Anzahl Knoten [Kreuzungen und Endpunkte/hängende Knoten], v_l = Anzahl Kreuzungen, p = Anzahl Teilgraphen, L = Länge, G = gesamter Radwegenetz-Graph, TG = Teilgraph; in Anlehnung an Bachofer et al. (2010))

Indikator	Berechnung	Anmerkungen
Alpha-Index	$\alpha = \frac{e - v + p}{2v - 5}$	<ul style="list-style-type: none"> • Topologischer Konnektivitätsindikator • Verhältnis vorhandene Cycles ($e - v + p$) zu maximal möglichen Cycles ($2v - 5$) • Cycle = Rundkurs → Maß für die Zirkularität • Bei Straßennetzen i. d. R. Teilgraphen $p = 1$ verwendet • Werte von 0 bis 1 (bei planaren Graphen, 0 = keine Rundkurse, 1 = vollständig verbundener planarer Graph) • Je höher der Wert, desto höher die Konnektivität bzw. die Zirkularität ↗
Connected-Node-Ratio (CNR)	$CNR = \frac{v_l}{v}$	<ul style="list-style-type: none"> • Topologischer Konnektivitätsindikator • Anteil Kreuzungen an allen Knoten • Werte von 0 bis 1 (0 = Graph nur einzelne Kanten, 1 = unwahrscheinlich, wenn Radwegenetze auf Gemeindegebiete zugeschnitten werden und „künstlich“ Endknoten entstehen) • Je höher der Wert, desto höher die Konnektivität ↗
Eta-Index	$\eta = \frac{L(G)}{v_l}$	<ul style="list-style-type: none"> • Metrischer Konnektivitätsindikator • Länge gesamter Graph geteilt durch Anzahl Kreuzungen („durchschnittlich aller wie viel Meter/Kilometer im Radwegenetz eine Kreuzung ist“) • Keine Werte, wenn keine Kreuzungen (DIV/0) • Je geringer der Wert, desto höher die Konnektivität ↘
Pi-Index	$\pi = \frac{L(TG)}{D(d_{TG})}$	<ul style="list-style-type: none"> • Metrischer Konnektivitätsindikator • Hier nur für den längsten Teilgraphen ermittelt • Länge des längsten Teilgraphen $L(TG)$ geteilt durch die Distanz entlang des Durchmessers des längsten Teilgraphen $D(d_{TG})$ (wobei Durchmesser d_{TG} = kürzeste Route zwischen den am weitesten entfernten Knoten im Teilgraphen)

Indikator	Berechnung	Anmerkungen
		<ul style="list-style-type: none"> → auch Indikator für die Form des Netzwerkes: Ein gestrecktes Netzwerk wird einen kleineren Pi-Index haben, als ein kompaktes Netzwerk Werte ab 1 (1 = längster Teilgraph besteht nur aus einer Kante ohne Kreuzungen) Ein hoher Wert zeigt ein gut entwickeltes (Teil-)Netzwerk an ↗
Verhältnis Länge Radwege zu Länge Straßen	$\frac{L(G)}{L(\text{Straßen})}$	<ul style="list-style-type: none"> Eigener metrischer Indikator Werte ab 0 Je höher der Wert, desto weiter ausgebaut das Radwegenetz im Vergleich zum Straßennetz ↗

2.4 Berechnen der Korrelationen

Die Indikatoren sowie der Fahrradanteil sind metrisch skaliert, die Bewertungen im Fahrradklimatest ordinal, deshalb wurde für alle Korrelationen Spearman's Rangkorrelationskoeffizient r_{sp} berechnet, für den auch eine Normalverteilung der Werte keine Voraussetzung ist (mit der R-Funktion `rcorr()` aus dem Paket „mscic“ von Harrell, 2021). Er wurde für alle Mittelstädte sowie getrennt nach den auch im FKT verwendeten Ortsgrößengruppen ermittelt: große Mittelstädte mit 50.000–100.000 Einwohnern und kleine Mittelstädte mit 20.000–50.000 Einwohnern.

3 Ergebnisse

3.1 Statistik zu Kenngrößen und Indikatoren

In beiden Ortsgrößengruppen und damit auch bei allen 621 Mittelstädten gibt es enorme Spannweiten der Kenngrößen und Indikatoren. Das kürzeste Radwegenetz ist 4 km lang, das längste 235 km. Im Mittel sind die Radwegenetze der kleinen Mittelstädte halb so lang wie die der großen Mittelstädte: 44,2 km zu 93,7 km. Die Mittelwerte der Gemeindeflächen liegen hingegen nur 10 % auseinander: 83,3 km² zu 90,6 km² (nach BKG, 2019). Auf einen Kilometer Straße kommen im Mittel nur 208 m Radweg (min. 16 m und max. 580 m).

Wie vermutet, gibt es keine vollständig verbundenen Radwegenetze – bei den großen Mittelstädten bestehen sie aus durchschnittlich 107 Teilgraphen (TG), bei den kleinen Mittelstädten aus 53 TG. Weniger TG stehen aber eher für kürzere Netze als eine höhere Konnektivität ($r_{sp} = 0,67$, $p \leq 0,001$ für Anzahl Teilgraphen und Länge gesamter Graph für alle Mittelstädte).

Mit einem mittleren Alpha-Index von 0,029 für alle Mittelstädte ist die Zirkularität sehr gering. Bei 37 von 511 kleinen Mittelstädten gibt es überhaupt keine Rundkurse im Radwegenetz (Alpha-Index = 0). Die große Mittelstadt Neubrandenburg in Mecklenburg-Vorpommern, die einen Fahrradanteil von 17,5 % hat (TU Dresden, 2021), erreicht bei CNR und Alpha-Index die höchsten Werte aller Mittelstädte – sie reichen fast an die Werte des Straßennetzes für diese Stadt heran ($CNR_{\text{Radwege}} = 0,682$ und $CNR_{\text{Straßen}} = 0,766$, $\text{Alpha}_{\text{Radwege}} = 0,141$ und $\text{Alpha}_{\text{Straßen}} = 0,165$, Indikatoren für das Straßennetz beispielhaft ermittelt). In

Neubrandenburg kommen 400 m Radweg auf 1 km Straße. In der Karte sieht das Radwegnetz auch wie ein Netz aus (Abb. 2 links), was aber auch durch das radial und zirkular angelegte Straßennetz begünstigt wird.

Den überhaupt kleinstmöglichen Pi-Index von 1, bei dem der längste Teilgraph nur aus einer Kante ohne Kreuzungen besteht, gibt es bei 25 kleinen und zwei großen Mittelstädten. Eine der beiden großen Mittelstädte ist Plauen in Sachsen, das mit 1,8 % den niedrigsten Fahrradanteil (TU Dresden, 2016) aller Mittelstädte hat, für die ein Modal Split recherchiert wurde. In Plauen kommen nur 80 m Radweg auf 1 km Straße. Die Zerstückelung des Radwegenetzes sieht man auch gut im Bild (Abb. 2 rechts). Selbst an der Weißen Elster gibt es keine durchgängigen (in OSM enthaltenen) Radwege.

Zwischen den topologischen und metrischen Indikatoren gibt es mittlere bis hohe Korrelationen, z. B. zwischen Alpha-Index und Pi-Index des längsten Teilgraphen $r_{sp} = 0,70$ und zwischen CNR und dem „Verhältnis Länge Radwege zu Straßen“ $r_{sp} = 0,73$ ($p \leq 0,001$).

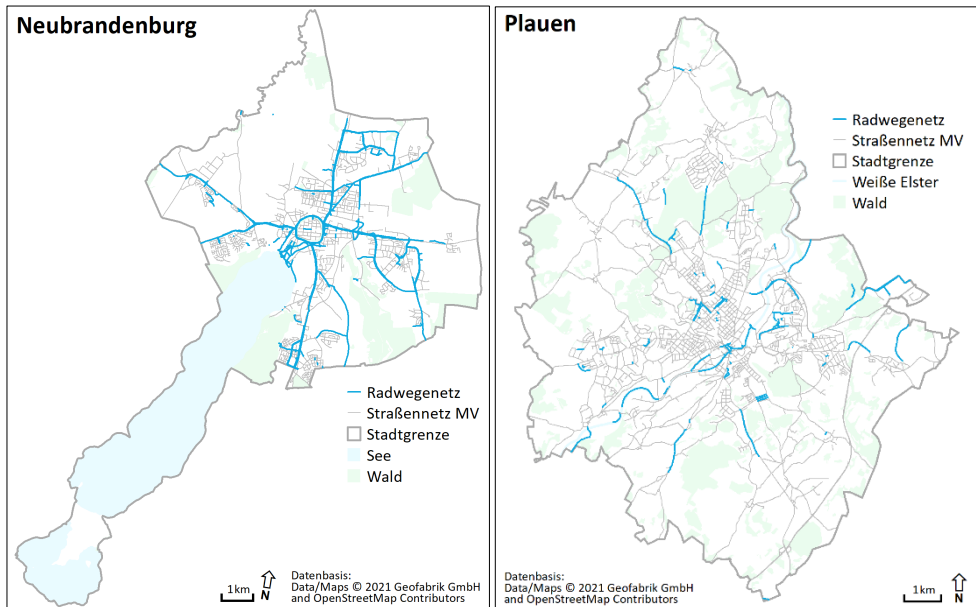


Abb. 2: Radwegnetz in den großen Mittelstädten Neubrandenburg und Plauen

3.2 Korrelation Indikatoren und Fahrradklimatest

Für alle Korrelationskoeffizienten stimmt die angenommene Richtung des Zusammenhangs. Beim Eta-Index, der besser einzustufen ist, je kleiner er ist, ergibt sich ein positiver Zusammenhang. Bei allen anderen Indikatoren ist er negativ, d. h., je größer der Wert des Indikators, desto kleiner der Wert im FKT, was einer besseren Note entspricht.

Die höchsten Korrelationen werden jeweils in der Ortsgrößengruppe der großen Mittelstädte erreicht (Tab. 4). Dabei ergeben sich bei den topologischen und metrischen Indikatoren ähnlich große Koeffizienten: zwischen CNR und Frage 3 („eingeschätzter“ Fahrradanteil) $r_{sp} = -0,53$, zwischen Pi-Index des längsten Teilgraphen und Frage 3 $r_{sp} = -0,60$. Das sind

mittlere Korrelationen nach einer Einstufung in Hinkle, Wiersma und Jurs (2003). Die Korrelationen bei den kleinen Mittelstädten sind deutlich niedriger und damit auch die aller Mittelstädte zusammen.

Tabelle 4: Korrelationen (Spearman) für Indikatoren und ADFC-Fahrradklima-Test 2020 (jeweils ¹ für 522 von 621 Mittelstädten, ² für 109 von 110 gr. MSt., ³ für 413 von 511 kl. MSt.; \nearrow = je größer, desto besser, \searrow = je kleiner, desto besser; n. s. = nicht signifikant [$p > 0,05$], * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$, sonst $p \leq 0,001$)

	FKT Gesamt- bewertung \searrow	FKT Frage 3 \searrow	FKT Frage 23 \searrow	FKT Frage 24 \searrow
Alpha-Index \nearrow – alle Mittelstädte ¹	n. s.	-0,26	-0,27	-0,22
Alpha-Index – große Mittelstädte ²	-0,30**	-0,46	-0,48	-0,47
Alpha-Index – kleine Mittelstädte ³	n.s.	-0,25	-0,25	-0,21
CNR \nearrow – alle MSt.	-0,18	-0,38	-0,39	-0,35
CNR – große MSt.	-0,37	-0,53	-0,56	-0,55
CNR – kleine MSt.	-0,17	-0,39	-0,37	-0,35
Eta-Index \searrow – alle MSt.	0,16	0,12	0,24**	0,17
Eta-Index – große MSt.	0,35	0,35	0,41	0,41
Eta-Index – kleine MSt.	0,14**	0,10*	0,20	0,14**
Pi-Index längster TG \nearrow – alle MSt.	-0,19	-0,31	-0,34	-0,30
Pi-Index längster TG – große MSt.	-0,43	-0,60	-0,58	-0,58
Pi-Index längster TG – kleine MSt.	-0,18	-0,30	-0,32	-0,29
Verhältnis Länge Radwege zu Straßen \nearrow – alle MSt.	-0,21	-0,43	-0,43	-0,39
Verhältnis Radwege Straßen – gr. MSt.	-0,41	-0,61	-0,61	0,60
Verhältnis Radwege Straßen – kl. MSt.	-0,20	-0,42	-0,41	-0,38
Länge Radwege \nearrow – alle MSt.	-0,18	-0,41	-0,36	-0,34
Länge Radwege – große MSt.	-0,42	-0,61	-0,56	-0,56
Länge Radwege – kleine MSt.	-0,22	-0,50	-0,39	-0,41

3.3 Korrelation Indikatoren und Anteil Fahrrad am Modal Split

Auch hier stimmen die Richtungen des Zusammenhangs, nur eben umgedreht zum FKT. Die höchsten Koeffizienten werden wieder in der Gruppe der großen Mittelstädte erreicht, mit ähnlichen Werten wie beim FKT, z. B. für den Pi-Index des längsten Teilgraphen $r_{sp} = 0,64$. Bei den kleinen Mittelstädten ergibt sich ein noch gemischteres Bild im Vergleich zum FKT.

Tabelle 5: Korrelationen (Spearman) für Indikatoren und Anteil Fahrrad am Modal Split (jeweils ¹ für 174 von 621 deutschen Mittelstädten, ² für 61 von 110 große MSt., ³ für 113 von 511 kleine MSt.; ↗ = je größer, desto besser, ↘ = je kleiner, desto besser; n.s. = nicht signifikant [$p > 0,05$], * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$, sonst $p \leq 0,001$)

	MS Fahrrad – alle Mittelstädte ¹ ↗	MS Fahrrad – große Mittelstädte ² ↗	MS Fahrrad – kleine Mittelstädte ³ ↗
Alpha-Index ↗	0,36	0,52	0,30**
CNR ↗	0,41	0,55	0,36
Eta-Index ↘	-0,17*	-0,30*	n. s.
Pi-Index längster TG ↗	0,44	0,64	0,35
Verhältnis Länge Radwege zu Straßen ↗	0,36	0,58	0,24*
Länge Radwege ↗	0,52	0,58	0,57

3.4 Korrelation Fahrradklimatest und Anteil Fahrrad am Modal Split

Die Fragen 3, 23 und 24 erreichen die höchsten Korrelationen der 27 Einzelfragen des FKT mit dem recherchierten Fahrradanteil. Die „eingeschätzte“ Konnektivität (Fragen 23 und 24) erreicht in allen Ortsgrößengruppen höhere Korrelationen (Tab. 6) als die gemessene Konnektivität (Tab. 5). Die überhaupt höchsten Korrelationen werden bei Frage 3 („eingeschätzter“ Fahrradanteil) erzielt. Es scheint also, dass die Radfahrenden den Radverkehrsanteil in ihrer Stadt gut einschätzen können.

Tabelle 6: Korrelationen (Spearman) ADFC-Fahrradklima-Test 2020 und Anteil Fahrrad am Modal Split (jeweils ¹ für 168 von 522 Mittelstädten im FKT, ² für 60 von 109 große MSt. im FKT, ³ für 108 von 413 kleine MSt. im FKT; ↗ = je größer, desto besser, ↘ = je kleiner, desto besser; überall $p \leq 0,001$)

	FKT Gesamtbewertung ↘	FKT Frage 3 ↘	FKT Frage 23 ↘	FKT Frage 24 ↘
Modal Split Fahrrad ↗ – alle MSt.	-0,51	-0,77	-0,63	-0,66
Modal Split Fahrrad – große MSt.	-0,52	-0,80	-0,63	-0,67
Modal Split Fahrrad – kleine MSt.	-0,52	-0,76	-0,64	-0,67

4 Diskussion und Fazit

Es wurden signifikante Zusammenhänge mit bis zu mittlerer Stärke zwischen der Konnektivität der Radwegenetze und dem Fahrradanteil genutzter Verkehrsmittel in deutschen Mittelstädten ermittelt. Eine Kausalität lässt sich aus der Korrelationsanalyse nicht ableiten.

Darüber hinaus scheinen andere Faktoren die Konnektivität zu bestimmen und damit eher Einfluss auf den Fahrradanteil zu haben, wie die Länge des Radwegenetzes und das Relief im Stadtgebiet. Der metrische Indikator „Verhältnis Länge Radwege zu Straßen“ und die

absolute Länge der Radwege erreichen gleich hohe Korrelationen mit dem Fahrradanteil wie die Konnektivitätsindikatoren. Gleichzeitig gibt es hohe Korrelationen zwischen den topologischen und den metrischen Indikatoren (vgl. 3.1). Das heißt, ein Radwegenetz ist komplexer und zusammenhängender, je größer bzw. länger es ist. Nobis (2019) hat für die MiD 2017-Daten ermittelt, dass der Fahrradanteil umso geringer ist, je stärker die Höhenunterschiede im Wohnumfeld bzw. zum Siedlungsschwerpunkt des Wohnortes sind. Der Vergleich der räumlichen Verteilung der recherchierten Fahrradanteile, die auch Werte aus MiD 2017 enthalten (Abb. 1 links) und einiger Indikatoren (z. B. CNR in Abb. 1 rechts) mit hohen, also besseren Werten im norddeutschen Tiefland und niedrigen Werten im Mittelgebirge, deutet an, dass die Hangneigung und damit die Steigung der Radwege auch die Konnektivität beeinflussen.

Bei den kleinen Mittelstädten ergeben sich immer geringere Korrelationen als bei den großen Mittelstädten. Diese Gruppe scheint also bei einer Einteilung nach nur einem demografischen Merkmal – der Einwohnerzahl – viel uneinheitlicher zu sein, als die der großen Mittelstädte. Weitere Schichtungen der Mittelstädte könnten geprüft werden, um einheitlichere Gruppen zu erhalten und den Einfluss der Konnektivität besser abschätzen zu können: in Bezug auf das Relief, z. B. nach Klassen mittlerer Hangneigung im Stadtgebiet, in Bezug auf vergleichbarere Raum- und Siedlungsstrukturen, z. B. nach den regionalstatistischen Regionstypen „Stadtregion“ und „Ländliche Region“, wie im MiD 2017 (Nobis & Kuhnimhof, 2018).

Die Konnektivitätsindikatoren sind unterschiedlich aufwendig zu ermitteln, zeigen unterschiedliche Blickwinkel auf die Netze und liefern unterschiedlich starke Korrelationen. Ob die Konnektivität, repräsentiert durch einen Konnektivitätsindikator oder eine Kombination mehrerer Konnektivitätsindikatoren (wie bei Molaei et al., 2021) in einem Set mit anderen Faktoren der gebauten Umgebung, Faktoren der natürlichen Umgebung (wie dem Relief), sozioökonomischen und psychologischen Faktoren einen deutlichen Beitrag zur Erklärung des Radverkehrsanteils liefern könnte, ist fraglich.

Der Einfluss der Vollständigkeit und Qualität der OSM-Daten, der Auswahl der OSM-Linien und deren Aufbereitung als ungerichtete Graphen auf die Konnektivitätsindikatoren sollte anhand von Fallbeispielen näher untersucht werden, z. B. den in 3.1 genannten. Bei Neubrandenburg könnten diese Aspekte zu einer Überschätzung und bei Plauen zu einer Unterschätzung der Werte geführt haben.

Kritisch kann man auch die Auswahl der Städte mit Modal Split sehen, die nicht einheitlich und nicht repräsentativ ist (z. B. in Bezug auf die räumliche Verteilung).

Trotz der o. g. Diskussionspunkte und weiteren Untersuchungsmöglichkeiten lässt sich festhalten, dass ein gut ausgebautes und vernetztes Radwegesystem tendenziell zu einer häufigeren Nutzung des Fahrrads führt, was die Politik auf Bundes-, Landes-, Regions- und kommunaler Ebene dazu ermutigen sollte, den qualitativen und quantitativen Ausbau des Radwegesystems auch weiterhin prioritär zu verfolgen.

Literatur

Abad, L. & van der Meer, L. (2018). Quantifying Bicycle Network Connectivity in Lisbon Using Open Data. *Information*, 9(11), 287. <https://doi.org/10.3390/info9110287>.

- Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club e. V. (2021, März). *ADFC-Fahrradklima-Test 2020 – Ergebnistabelle*. Berlin. Retrieved May 7, 2021, from https://fahrradklima-test.adfc.de/fileadmin/BV/FKT/Download-Material/Ergebnisse_2020/ADFC-Fahrradklima-Test_2020_Ergebnistabelle_Druck_Gesamt_A3.pdf.
- Bachofer, F., Klett, S., & Hochschild, V. (2010). Verkehrsraumbewertung anhand lokaler und regionaler Indizes. *Angewandte Geoinformatik* 2010, 464–473.
- Boeing, G. (2017). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2019). *Verwaltungsgebiete 1:250 000 mit Einwohnerzahlen (Ebenen), (VG250-EW 31.12.)* (Stand: 31.12.2019). Retrieved from <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/open-data/verwaltungsgebiete-1-250-000-mit-einwohnerzahlen-ebenen-stand-31-12-vg250-ew-ebenen-31-12.html>.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Ed.) (2021). *Fahrradland Deutschland 2030. Nationaler Radverkehrsplan 3.0*. Retrieved from https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/nationaler-radverkehrsplan-3-0.pdf?__blob=publicationFile.
- Dill, J. (2004). *Measuring Network Connectivity for Bicycling and Walking*. Presented at the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC January 11-15, 2004. Retrieved from <https://repository.difu.de/jspui/bitstream/difu/126156/1/DB0499.pdf>.
- Geofabrik GmbH and OpenStreetMap Contributors (2021). *Download OpenStreetMap data for this region: Germany*. Retrieved Feb 25, 2021, from <https://download.geofabrik.de/europe/germany.html>.
- Hagberg, A., Swart, P. J., & Schult, D. A. (2008). *Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX*. Los Alamos National Lab (LANL), Los Alamos, NM (United States).
- Haklay, M. (2010). How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(4), 682–703. <https://doi.org/10.1068/b35097>.
- Harrell, F. E. (2021). Hmisc: A package of miscellaneous R functions. With contributions from Charles Dupont and many others (Version 4.5-0). Retrieved from <https://hbiostat.org/R/Hmisc/>.
- Hinkle, D. E., Wiersma, W., & Jurs, S. G. (2003). *Applied statistics for the behavioral sciences* (Vol. 663, 5th Ed.). Boston: Houghton Mifflin.
- Hochmair, H. (2020). Von A nach B? – Erreichbarkeits- und Konnektivitätsanalysen in Verkehrsnetzwerken. In: B. Zagel & M. Loidl (Eds.), *Geo-IT in Mobilität und Verkehr. Geoinformatik als Grundlage für moderne Verkehrsplanung und Mobilitätsmanagement*. Berlin/Offenbach: Wichmann.
- Infas, DLR, IVT und infas 360. (2019). *Mobilität in Deutschland 2017 – Ergebnisse der regionalstatistischen Schätzung (im Auftrag des BMVI)*. Excel-Datei. Retrieved June 25, 2021, from <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/publikationen2017.html>.
- Jilin, D., Navratil, G., Clementini, E., & Fogliaroni, P. (2019). OpenStreetMap als kommunale Kartengrundlage. *AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik*, 5-2019, 236–245. <https://doi.org/10.14627/537669022>.

- Larsen, J., Patterson, Z., & El-Geneidy, A. (2013). Build It. But Where? The Use of Geographic Information Systems in Identifying Locations for New Cycling Infrastructure. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7(4), 299–317. <https://doi.org/10.1080/15568318.2011.631098>.
- Lowry, M., & Loh, T. H. (2017). Quantifying bicycle network connectivity. *Preventive Medicine*, 95 Suppl, S134–S140. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2016.12.007>.
- Minghini, M., & Frassinelli, F. (2019). OpenStreetMap history for intrinsic quality assessment: Is OSM up-to-date? *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0067-x>.
- Molaei, P., Tang, L., & Hardie, M. (2021). Measuring Walkability with Street Connectivity and Physical Activity: A Case Study in Iran. *World*, (2), 49–61. <https://doi.org/10.3390/world2010004>.
- Moore, S. (2020). ArcGIS Editor for OSM 10.8.x Desktop. Retrieved from <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=2f58a77a65c546149dd1ea425a680ad3>.
- Moudon, A. V., Lee, C., Cheadle, A. D., Collier, C. W., Johnson, D., Schmid, T. L. et al. (2005). Cycling and the Built Environment, a US Perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(3), 245–261. Retrieved from http://people.ucalgary.ca/~rjacobs/W_PAPERS/Matt_MGIS%20-%20cycling/urbancycling.pdf.
- Nobis, C. (2019). *Mobilität in Deutschland – MiD Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr. Studie von infas, DRL, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15)*. Bonn/Berlin. Retrieved from http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Analyse_zum_Rad_und_Fussverkehr.pdf.
- Nobis, C., & Kuhnimhof, T. (2018). *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DRL, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15)*. Bonn/Berlin. Retrieved from http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf.
- OpenStreetMap Foundation (2021). *OpenStreetMap Wiki. Bicycle*. OpenStreetMap Foundation. Retrieved Aug 8, 2021, from <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Bicycle>.
- Rodrigue, J.-P. (2020). *The Geography of Transport Systems* (5th Ed.). New York: Routledge. Retrieved from <https://transportgeography.org/>.
- Tresidder, M. (2005). *Using GIS to Measure Connectivity: An Exploration of Issues. Field Area Paper*. Portland State University – School of Urban Studies and Planning. Retrieved from http://www.web.pdx.edu/~jdill/Tresidder_Using_GIS_to_Measure_Connectivity.pdf.
- TU Dresden (2016). *Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2013“ – Städtevergleich*. TU Dresden, Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung. Retrieved June 18, 2021, from https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/ressourcen/dateien/SrV2013_Staedtevergleich.pdf.
- TU Dresden (2021). *Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2018“ – Städtevergleich*. TU Dresden, Professur für Integrierte Verkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik. Retrieved June 17, 2021, from https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/ressourcen/dateien/SrV2018_Staedtevergleich.pdf.