

Parametrisierung und Identifikation urbaner Straßenkreuzungen im Kontext der Feinstaubmodellierung

LUKAS BRAND¹ & MARC-OLIVER LÖWNER²

Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag widmet sich einem Formalismus, der Straßenkreuzungen als Strukturelement des urbanen Raumes beschreibt. Die vorgestellten Parameter dienen der GIS-basierten Identifizierung von Kreuzungstypen zur späteren Modellierung urbaner Feinstaubbelastungen. Die Entwicklung der Identifikationsmethode erfolgte anhand allgemein zugänglicher Geodaten des OpenStreetMap Projektes.

1 Einleitung

Die städtische Atmosphäre ist durch Feinstaubverunreinigungen in der Umgebungsluft gekennzeichnet. Die räumliche Variabilität der Feinstaubkonzentration ist neben Art und Verteilung der Emittenten signifikant vom lokalen Windfeld abhängig. Dabei wird das urbane, bodennahe Windfeld wesentlich durch die Morphologie der städtischen Bebauung beeinflusst. Hierbei werden insbesondere die Straßenschluchten (VARDOULAKIS ET AL. 2003) und deren Vegetation (BALCZÓ ET AL. 2009) betrachtet. Ein für die Belüftung von Stadtquartieren bisher wenig betrachtetes Strukturelement ist die Straßenkreuzung. Sie gewährleistet neben einem lokal erhöhten Luftvolumen und damit einer verstärkten Verdünnung der Feinstäube auch den Austausch und Abtransport von Feinstaub angrenzender, unterschiedlich belasteter Straßen. Dieser Austausch ist unter anderem von den Winkelverhältnissen adjazenter Straßen und von der absoluten Ausrichtung des Kreuzungssystems abhängig (NAKAMURA ET AL. 1988). Daher sind für die Beschreibung von Straßenkreuzungen diese Winkelgeometrien besonders zu berücksichtigen.

Hier wird eine Parametrisierung urbaner Straßenkreuzungen vorgestellt, die es ermöglicht, Straßenkreuzungstypen formal zu beschreiben. Diese werden halbautomatisch aus allgemein zugänglichen Geodaten des OpenStreetMap Projektes (OSM) (RAMM & TOPF, 2010) innerhalb der Programmierumgebung ArcPy in ArcMap identifiziert. Wichtigste Parameter der Typisierung sind dabei die Anzahl der adjazenten Straßenarme, die Lage zur Hauptwindrichtung und die daraus ableitbaren, relativen Winkel sowie die Straßenraumbreiten der beteiligten Knotenpunktarme. Darüber hinaus werden die den Straßenraum angrenzende Nutzungsflächen betrachtet.

Es ist geplant, diese klassifizierten und identifizierten Straßenkreuzungstypen im weiteren Verlauf für die geostatistische Modellierung von Feinstaubverteilungen unterstützend einzusetzen.

1) Lukas Brand, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig; E-Mail: l.brand@tu-bs.de

2) Marc-O. Löwner, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig; E-Mail: m-o.loewner@tu-bs.de

2 Prototypische Parametrisierung von Knotenpunkten

Eine bauliche Anlage, die der Verknüpfung von Verkehrswegen dient, wird im Straßen- und Verkehrswesen als Knotenpunkt bezeichnet. In den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (BAIER ET AL. 2006) werden die verknüpften Straßen an einem Knotenpunkt als Knotenpunktarme bezeichnet. Grundsätzlich erhöht sich der vom Knotenpunkt beanspruchte Raum und damit auch das zur Verfügung stehende Luftvolumen mit Zunahme der aufeinandertreffenden Knotenpunktarme.

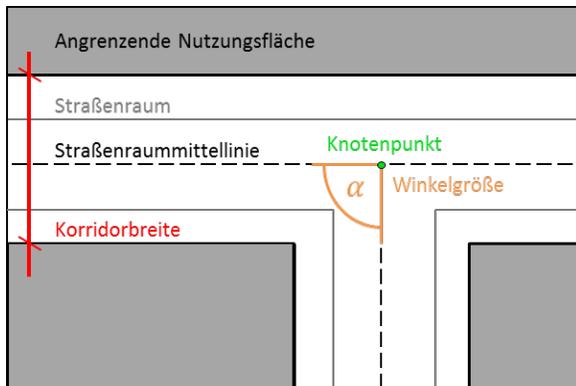


Abb. 1: Begriffsbestimmungen des Straßenraumes

In Anlehnung an Kanten und Knoten aus der Topologie werden Knotenpunktarme hier als zueinander adjazente Kanten (BILL, 1999) - respektive Straßenraummittellinien - verstanden (Abb. 1). Die Adjazenz erfolgt über den Knotenpunkt, welcher als Schnittpunkt der jeweiligen Korridor-mittellinien definiert ist. Die Anzahl der zueinander adjazenten Kanten beschreibt den *Knotenpunktrang* (nicht zu verwechseln mit dem Begriff des Ranges in der Topologie). Die relativen Winkel zwischen den Straßenraummittellinien werden in *Winkelgrößen* angegeben. Die rote Bemaßung misst die *Korridorbreite* der einzelnen beteiligten Verkehrswege. Bei Knotenpunkten mit mehreren Knotenpunktarmen verschiedener Korridorbreiten kann über deren Verhältnis untereinander der Knotenpunkt weiter parametrisiert werden. Die flankierenden, dem Straßenraum parallel zur Straßenraummittellinie angrenzenden Nutzungsflächen variieren in ihrer Gestaltung. Dabei wird zwischen versiegelten und unversiegelten Flächen unterschieden. Im Hinblick auf den Einfluss der Seitenrandbebauung werden sowohl verschiedene Ausprägungen von Freiflächen als auch Gebäudehöhen berücksichtigt.

2.1 Zweiarmlige Knotenpunkte – die Abbiegung

An einer Abbiegung treffen genau zwei Knotenpunktarme aufeinander, welche sich in einem Winkel α schneiden (Abb. 2, Links). Diese Winkelgröße hat einen Einfluss auf die Luftaustauschverhältnisse. Es wird postuliert, dass mit Zunahme der Winkelgröße die Durchströmung der Luft an der betrachteten Abbiegung gleichmäßiger verläuft, woraus eine gleichmäßigere Schadstoffverteilung ableitbar ist. Neben diesem Winkel-Parameter weist jeder Knotenpunktarm einen weiteren als Straßenwinkel $\zeta, \eta, \theta, \dots$ definierten, globalen Winkel auf. Die Straßenwinkel werden innerhalb der Quadranten I und II angegeben, um spätere Berechnungen von globalen Windrichtungswinkeln mit den Straßenwinkeln zu vereinfachen (Abb. 2, Mitte).

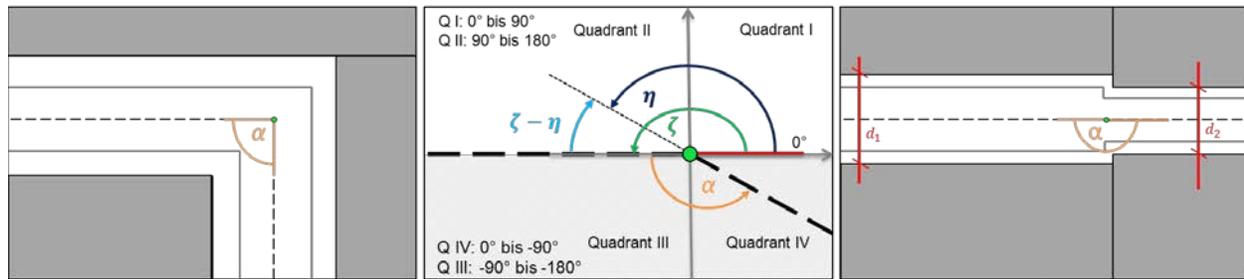


Abb. 2: Links: Abbiegung mit Winkel α ; Mitte: Straßenwinkelmaße innerhalb des 1. und 2. Quadranten; Rechts: Nullkreuzung mit $\alpha=180^\circ$ und unterschiedlichen Korridorbreiten

Im Fall eines gestreckten Winkels, $\alpha = 180^\circ$ (Abb. 2, Rechts), hat α selbst keinen Einfluss auf die Schadstoffverteilung. Diese als *Nullkreuzung* definierte Situation bedarf dennoch einer Betrachtung, da ein möglicher Korridorbreitenunterschied zwischen d_1 und d_2 den Luftaustausch beeinflussen kann.

Aus den Korridorbreiten der einzelnen Knotenpunktarme werden *Korridorbreitenverhältnisse* $\Delta d_{m,n}$ gemäß Formel 2.1 abgeleitet.

$$\Delta d_{2,1} = \frac{d_2}{d_1}, \quad 0 \leq \Delta d_{2,1} \leq 1 \quad (2.1)$$

Es ist davon auszugehen, dass das Verhältnis der Korridorbreiten einen Einfluss auf die Schadstoffverteilung bzw. deren Ausbreitung hat. Zum einen verändern sich Windverhältnisse mit der Breite des Korridors, zum anderen steigen in der Regel die Verkehrsstärken mit deutlicher Zunahme der Korridorbreite. Daraus lässt sich schließen, dass die Schadstoffverteilung mit steigendem Quotienten $\Delta d_{2,1}$ eine homogenere Ausprägung erlangt.

Nutzungsart und Größe der flankierenden Flächen sowie die Gestaltung des Straßenraums an sich haben einen Einfluss auf die Luftzirkulation. Gebäude wirken sich dabei insbesondere durch ihre Höhe auf die Luftströmungsverhältnisse aus. Je höher flankierende Gebäude sind, desto größer ist ihr Einfluss als Strömungshindernis (HOYDYSH ET AL. 1988). Auf versiegeltem, unbebautem Gelände (z.B. betoniert, asphaltiert, gepflastert) lagern sich Feinstäube zwar ab, können aber durch Luftzirkulation erneut aufgewirbelt werden. Unversiegelte Flächen haben hingegen einen positiven Einfluss auf die Feinstaubdeposition, da diese als Sickerflächen fungieren (TIWARY ET AL. 2010). Grünanlagen haben je nach Ausprägung und Jahreszeit sowohl positive, als auch negative Einflüsse. Rasen fördert die Deposition und ist kein nennenswerter Faktor für die Luftzirkulation (ENDLICHER ET AL. 2011). Bäume haben in Abhängigkeit ihrer Belaubung ebenfalls eine Filterleistung. Je nach Baumgröße, Kronenumfang und Kronendichte sind sie allerdings auch ein Strömungshindernis und können damit den Feinstaubabtransport lokal verschlechtern (GROMKE ET AL. 2009). Im Straßenraum gepflanzte Hecken beeinflussen die Feinstaubverteilung je nach Höhe, Dichte und Jahreszeit (KEUKEN ET AL. 2010). Neben den hier beispielhaft genannten Einflussfaktoren sind noch weitere Faktoren für eine vollständige Modellierung von Feinstaubverteilungen zu berücksichtigen.

Für einen Knotenpunkt des Ranges 2 können im Wesentlichen drei Situationen in Bezug auf dessen Straßenrandbebauung unterschieden werden. Sind beide Knotenpunktarme beidseitig bebaut, findet der Luftaustausch größtenteils längs der Fahrbahn statt und wird hauptsächlich von der Winkelgröße, den Korridorbreiten und den Gebäudehöhen beeinflusst (Abb. 3, Links). Wenn einer der Knotenpunktarme nur einseitig bebaut ist, wird die Schadstoffbelastung im

Knotenpunktbereich von der Art und der Ausprägung des flankierenden, unbebauten Bereiches zusätzlich beeinflusst (Abb. 3, Mitte). Der Einfluss von Winkelgrößen und Korridorbreiten kann abnehmen, wenn zwei einseitig bebaute Straßen aufeinandertreffen (Abb. 3, Rechts). Durch das unbebaute Gelände kann die Luft zwischen den blau markierten Punkten ausgetauscht werden. Ein möglicher Schadstoffabtransport oder -abbau durch Begrünung dieses Geländes hängt von der Gestalt des Bereiches ab. Eine Bepflanzung mit Bäumen kann bspw. zwar zur Akkumulation beitragen, allerdings auch den Luftaustausch einschränken (s.o.).

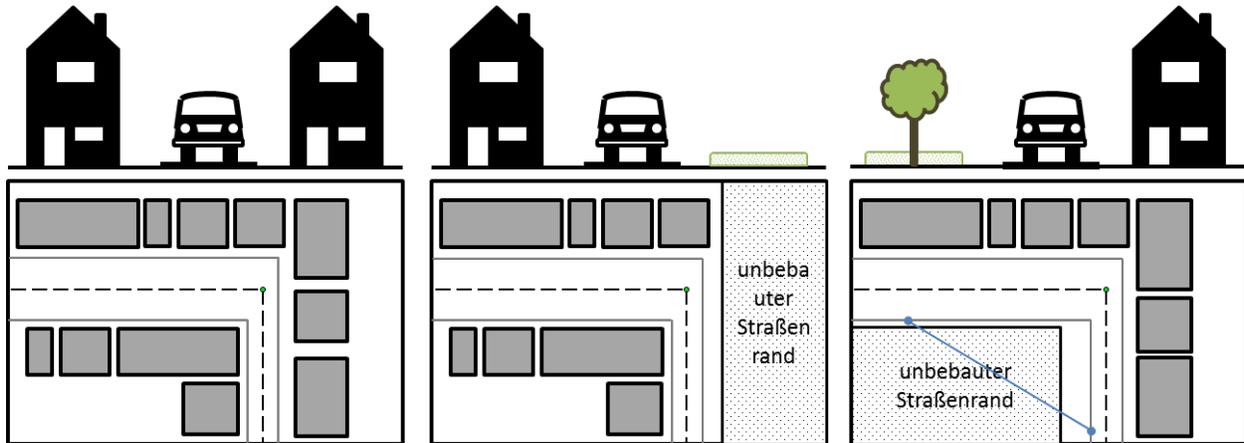


Abb. 3: Links: Beidseitig bebaute Abbiegung; Mitte: Einseitig unbebaute Abbiegung mit Rasenfläche; Rechts: Beidseitig unbebaute Abbiegung mit Baumbepflanzung; Oben: Verändert nach ERENS ET AL. (1993)

Die oben eingeführte Nullkreuzung ($\alpha = 180^\circ$) dient der Beschreibung von sowohl geometrischen Veränderungen, als auch Änderungen der flankierenden Nutzungsflächen im Straßenverlauf (Abb. 4, Links). Die rot gestrichelten Linien zeigen hier Grenzen zwischen Straßenabschnitten mit verschiedenen Seitenraumnutzungen.

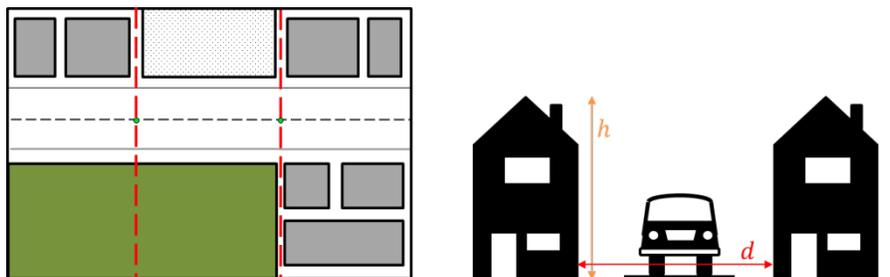


Abb. 4: Links: Nullkreuzungen bei Veränderung der flankierenden Flächennutzung; Rechts: Maße einer Straßenschlucht im Querschnitt

Im Falle von relativ schmalen Straßen mit kontinuierlicher, beidseitiger Bebauung wird von Straßenschluchten (street canyons) gesprochen (NICHOLSON, 1975). Die Straßenschluchtendimension ist als *Seitenverhältnis* (aspect ratio) gemäß Gleichung 2.2 definiert.

$$ar = \frac{h}{d} \quad (2.2)$$

Dabei wird die Höhe der Schlucht mit h und die Straßenraumbreite mit d ausgedrückt (Abb. 4, Rechts). Hier entspricht h den Gebäudehöhen am Straßenrand. Ein „Regular Canyon“ hat ein Seitenverhältnis $ar \approx 1$, von einem „Avenue Canyon“ wird bei Seitenverhältnissen unter 0,5 gesprochen und für $ar \geq 2$ gilt der Begriff „Deep Canyon“. Diese Einteilung erweitert den

Begriff „*Street Canyon*“ auch für breitere Straßen. Ferner werden Straßenschluchten als *symmetrisch* bezeichnet, wenn die flankierenden Gebäudehöhen ungefähr dieselben Höhen aufweisen. Straßenschluchten mit wesentlichen Gebäudehöhenunterschieden werden entsprechend als *asymmetrisch* bezeichnet (VARDOULAKIS ET AL. 2003).

2.2 Mehrarmige Knotenpunkte – Gabelung, Abzweigung und Straßenkreuzung

Kreuzungen mit drei aufeinandertreffenden Knotenpunktarmen werden als *Gabelungen* definiert. Anders als bei Abbiegungen werden an Gabelungen insgesamt drei Winkelgrößen α, β, γ aufgespannt, deren Summe einen Vollkreis von 360° ergibt (Abb. 5, Links). Ist einer der beteiligten Winkel ein gestreckter Winkel, wird die Gabelung als *Abzweigung* bezeichnet (Abb. 5, Mitte). Die verbleibenden zwei Winkelgrößen ergeben dann in ihrer Summe 180° .

Vierarmige Knotenpunkte werden hier als *Straßenkreuzungen* bezeichnet. Die Anzahl an Winkelgrößen, Straßenwinkeln und Korridorbreiten entspricht stets dem Rang des Knotenpunktes (Abb. 5, Rechts).

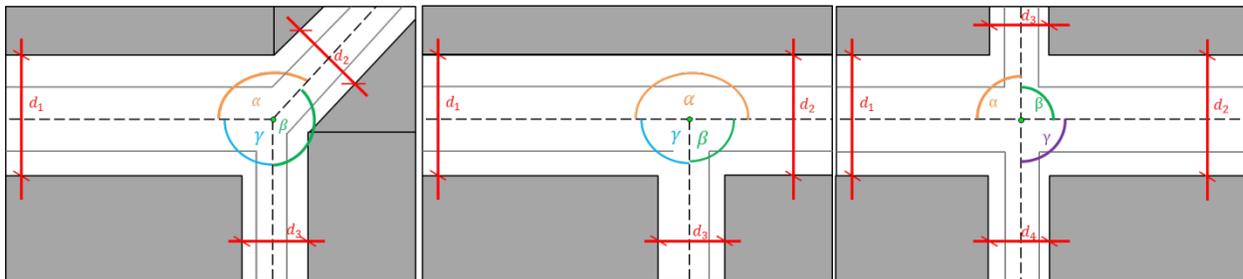


Abb. 5: Links: Gabelung; Mitte: Abzweigung; Rechts: Straßenkreuzung

Gleichermaßen erhöht sich mit Zunahme der Knotenpunktarme auch die Anzahl der Korridorbreitenverhältnisse. Für eine Gabelung resultieren nach Abb. 5, Links beispielsweise drei Quotienten (Formel 2.3).

$$\Delta d_{2,1} = \frac{d_2}{d_1} \quad ; \quad \Delta d_{3,2} = \frac{d_3}{d_2} \quad \text{und} \quad \Delta d_{3,1} = \frac{d_3}{d_1} \quad (2.3)$$

Analog zu den Überlegungen in Abschnitt 2.1 hängt der Einfluss von Winkelgrößen und Korridorbreiten auf die Luftbewegung bei mehrarmigen Knotenpunkten ebenfalls von der Nutzungsart der flankierenden Flächen ab.

2.3 Besondere Knotenpunkte – Kreisverkehre

Eine Sonderform der plangleichen Knotenpunkte stellen Kreisverkehre dar. Kreisverkehre haben eine Kreisfahrbahn, die an den Kreisverkehr angebundene Straßen miteinander verbindet. Anhand der Winkelgrößen der abgehenden Straßen werden zwei Typen von Kreisverkehren unterschieden. Treffen die verlängerten Straßenmittellinien im Kreismittelpunkt aufeinander, wird der Kreisverkehr mit einem Knotenpunkt als Kreismittelpunkt und der Angabe des Kreisradius r_k sowie den beschriebenen Straßenarmparametern beschrieben (Abb. 6, Links). Die Anzahl der Kreisverkehrsarme bestimmt den Rang des Kreisverkehrs. Winkelgrößen werden anhand der verlängerten Mittellinien am Knotenpunkt gemessen. Wenn sich die verlängerten Straßenmittellinien nicht im Kreismittelpunkt kreuzen, wird der Kreisverkehr über die Angabe mehrerer dreiarmer Knotenpunkte parametrisiert (Abb. 6, Rechts).

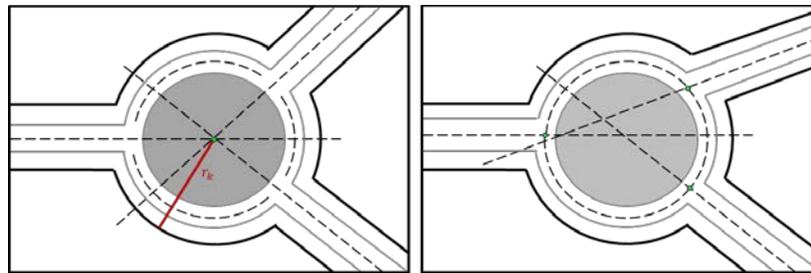


Abb. 6: Links: Kreisverkehr mit Kreismittelpunkt und Radius; Rechts: Kreisverkehr ohne Kreismittelpunkt

3 GIS-basierte Identifikation von Knotenpunkten

Anhand der entwickelten Parametrisierung wurde auf Basis der Programmierumgebung ArcPy (ArcInfo 10.0, ESRI Inc.) eine Methode entwickelt, die Knotenpunktrang, Straßenwinkel und Korridorbreite anhand von Shapefiles aus OSM identifiziert. Die Analyse gliedert sich in die Schritte *Datenaufbereitung*, *Knotenpunktanalyse* und *Winkel- und Korridorbreitenanalyse* (Abb. 7, Links).

In der Datenaufbereitung werden befahrene Straßen, Gebäudeumrisse sowie andere Nutzungsflächen als Eingangsdaten für die Parameter-Analyse aus den OSM-Daten extrahiert.

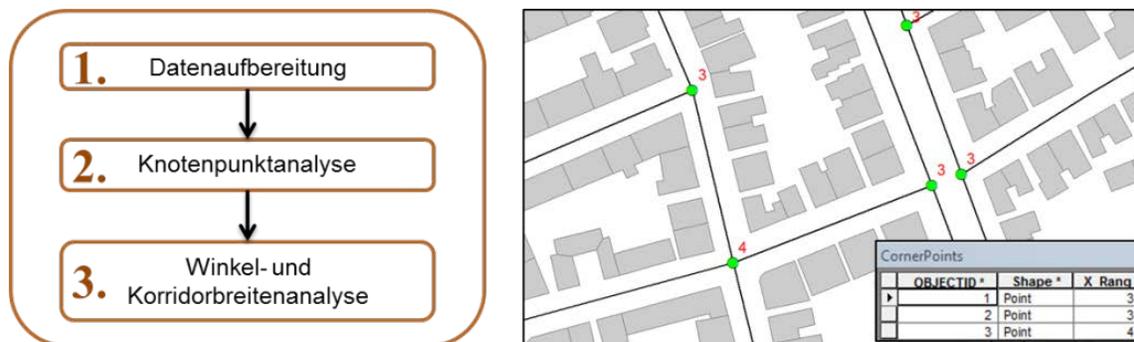


Abb. 7: Links: Workflow der Gesamtanalyse; Rechts: Ergebnis der Knotenpunktanalyse

Für die Berechnung der Knotenpunktränge werden an den Schnittpunkten der Straßen-Features Stützpunkte generiert. Für jeden abgehenden Knotenpunktarm wird dabei ein eigener Stützpunkt berechnet, sodass die Anzahl exakt übereinanderliegender Stützpunkte dem Knotenpunktrang entspricht. Diesen Stützpunkt-Features werden im Anschluss die X-Y-Koordinaten als Attribute angehängt. Daraus wird die Anzahl identischer Koordinaten identifiziert und als Attribut „Knotenpunktrang“ den Stützpunkten angehängt. Als Ergebnis der Knotenpunktanalyse wird eine Point-Feature-Class der Kreuzungspunkte mit dem Attribut „X_Rang“ ausgegeben (Abb. 7, Rechts).

Die Berechnung der Korridorbreiten basiert auf der Bestimmung von Straßenwinkeln, welche zwischen Knotenpunkten und Straßen berechnet werden (Abb. 8, Links). Dafür werden Straßenlinienabschnitte in der Nähe der Kreuzungssituation extrahiert, für die in einem weiteren Schritt auch die Abstände und Winkel zu benachbarten Features berechnet werden. Diese im Folgenden *Near-Features* genannten Gebäudeumrisse und andere Nutzungsflächen dienen der Berechnung der Korridorbreiten in Knotenpunktnähe. Die Korridorbreite setzt sich zusammen aus dem Abstand zu dem jeweils nächstgelegenen Near-Feature links und rechts der

Straßenlinienabschnitte. Pro Korridor werden so genau zwei Near-Features orthogonal zur Straßenlinie gesucht. Die Straßenwinkel werden hier genutzt, um den Suchbereich der Near-Features orthogonal zum Straßenlinienabschnitt zu bestimmen (Abb. 8, Rechts).

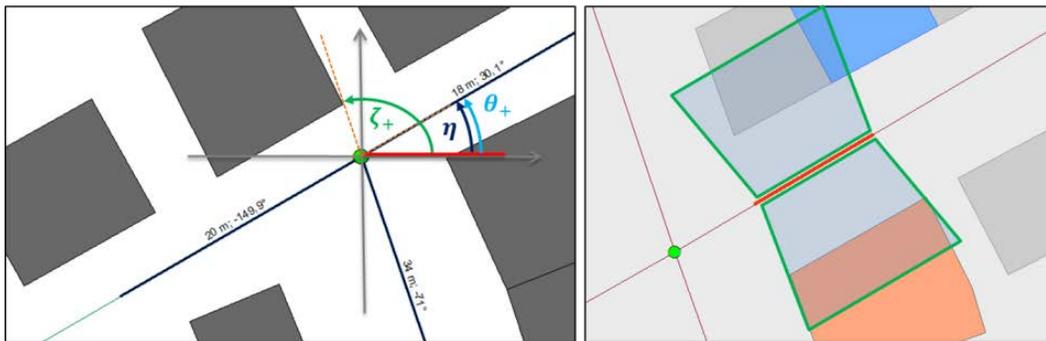


Abb. 8: Links: Berechnung der Straßenwinkel in ArcGIS; Rechts: Suchbereich für Near-Features in der Korridorbreitenanalyse

Das Gesamtergebnis der Identifikation ist eine Point-Feature-Class, in der pro Kreuzungssituation jeder Anfangspunkt eines Knotenpunktarms durch ein Point-Feature vorhanden ist. Ein Ausschnitt der Attributtabelle der Ausgabe-datei ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Endergebnis der Identifikation - Attributtabelle der Ausgabe-Feature-Class

OBJECTID*	Shape*	TARGET FID	JOIN FID	X Rang	osm_id	NEAR_ANGLE	WIDTH	POS NEAR ID	NEG NEAR ID	PosNearName	NegNearName
65	Point	23	201	3	2325795	32,218721	29	313	278	building	building
66	Point	24	17	4	4364844	-70,394104	35	216	210	building	building
67	Point	24	18	4	4364844	108,51123	36	2579	129	building	building
68	Point	24	206	4	2325795	30,591144	31	211	126	building	building
69	Point	24	207	4	2325795	-150,351347	32	216	138	building	building
70	Point	25	86	4	5229165	-71,440935	33	199	236	building	building

Exemplarisch sind hier für eine Straßenkreuzung vier Zeilen mit identischer Knotenpunkt-ID „TARGET_FID“ dargestellt (Hervorhebung). Der Kreuzungsrang ist unter „X_Rang“, die Korridorbreite unter „WIDTH“ und die Straßenwinkel unter „NEAR_ANGLE“ abgespeichert. Die Informationen der Near-Features befinden sich in den Zeilen „POS_NEAR_ID“, „NEG_NEAR_ID“, „PosNearName“ und „NegNearName“.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die oben beschriebene Methode wurde anhand von OSM-Daten der Stadt Braunschweig entwickelt und getestet. Die Analysen zeigen, dass an allen Straßenschnittpunkten tatsächlich Knotenpunkte identifiziert werden können (Abb. 9, Links). Die genauere Betrachtung der Ergebnisse zeigt weiter, dass die Methode an typischen Kreuzungssituationen des urbanen Raumes Knotenpunktränge, Straßenwinkel und Korridorbreiten aus OSM-Daten analysieren kann (Abb. 9, Mitte). Zusätzlich zu den genannten Parametern werden auch Informationen über berechnungsrelevante Near-Features zurückgegeben (Tab. 1).

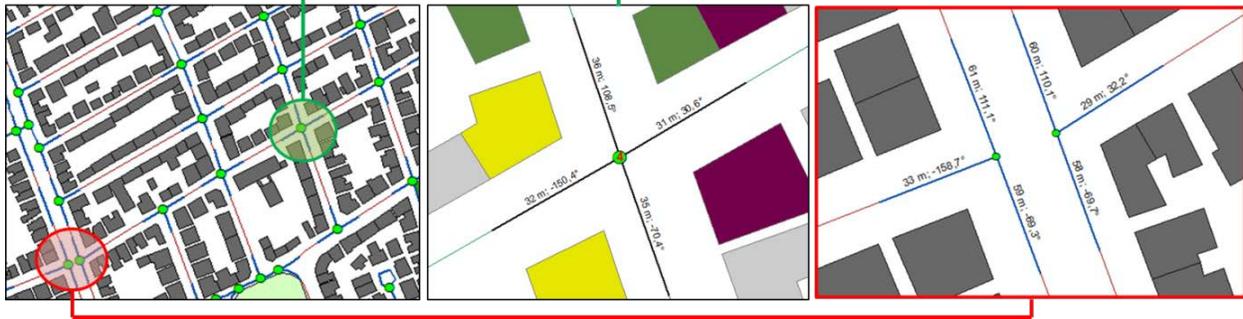


Abb. 9: Links: Ergebnisausschnitt für ein Wohngebiet der Stadt Braunschweig; Mitte: Beispiel einer korrekt analysierten Straßenkreuzung; Rechts: Beispiel eines zu hochaufgelösten Knotenpunktes

Probleme bei der eindeutigen Identifizierung eines Knotenpunktes treten bisweilen an Kreuzungssituationen mit einem hohen Detaillierungsgrad der Eingangsdaten auf (Abb. 9, Rechts). Sind die Straßen-Features aus OSM nicht als Straßenraummittellinien, sondern bspw. als Richtungsfahrbahnen zu interpretieren, gibt der Algorithmus mehrere Knotenpunkt-Features mit unterschiedlichen Koordinaten für eine einzige Straßenkreuzung zurück. Zur Eliminierung dieser Effekte sind Ansätze aus dem Bereich der Computational Geometry (FLORIANI ET AL. 1999) weiter zu verfolgen, um den Detaillierungsgrad der Eingabedateien in der Datenaufbereitung anzupassen.

Die Korridorbreitenanalyse ist mit der Identifizierung flankierender Gebäude oder anderer Nutzungsflächen in Kreuzungsnähe gekoppelt. In Bereichen in denen keine Near-Features vorhanden sind, gibt die Methode Korridorbreiten zurück, die von den tatsächlichen Breiten abweichen. Die Qualität der Ergebnisse hängt also von der Qualität und Vollständigkeit der Eingabedaten ab. Es wird angenommen, dass Eingabedaten von mangelhafter Qualität durch eine aufwändige Aufbereitung, bspw. durch manuelle Digitalisierung fehlender Near-Features, den Output der Methode verbessern würden.

Von den eingeführten Parametern aus Kapitel 2 werden bisher Knotenpunktränge, Straßenwinkel und Korridorbreiten direkt zurückgegeben. Diese Parameter ermöglichen Rückschlüsse auf Korridorbreitenverhältnisse sowie auf Winkelgrößen. Nach einer Implementierung dieser Zusammenhänge wird die Methode dazu geeignet sein, die zweidimensionalen Parameter aus Kapitel 2 vollständig zu analysieren. Attribute wie z.B. Gebäudehöhen, Fassadenbeschaffenheit oder Bepflanzungsart werden von dem Analyseverfahren aufgrund fehlender Eingabedaten bisher nicht betrachtet.

Im Zuge dieser Schlussfolgerungen ist das Datenmodell der Eingangsdaten zu überdenken. Die Vorteile von OSM liegen vor allem in der freien Verfügbarkeit der Daten. Geprüfte Datenmodelle, wie zum Beispiel von Katasterämtern, würden jedoch zuverlässigere Ergebnisse liefern. Außerdem fehlen den verwendeten Shapefiles von OSM detailliertere Informationen wie bspw. Gebäudehöhen, was den Algorithmus bisher auf eine zweidimensionale Analyse beschränkt. Die Verwendung von standardisierten 3D Stadtmodellen wie CityGML (GRÖGER 2012, LÖWNER, ET AL. 2012, 2013) ist an dieser Stelle also unabdinglich.

5 Literaturverzeichnis

- BAIER R.; EILRICH W.; HALLER, W.; HEINZ, H.; LENTZ, D.; LERNER, M.; MAIER, R.; MANNS, F.-J.; MÜLLER-ETTLER, M.; NIKOLAUS, H.; SEYBOTH, A.; SILVANUS, M.; STEINBRECHER, J.; TOPP, H. & ALRUTZ, D., 2006: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- BALCZÓ, M.; GROMKE, C.; RUCK, B., 2009: Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting, *Meteorologisch Zeitschrift*, **18**(2), S. 197-206.
- BILL, R., 1999: Grundlagen der Geoinformationssysteme, Band 1, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- EERENS, H. C.; SLIGGERS, C.J. & VAN DEN HOUT, K.D., 1993: THE CAR MODEL: The Dutch method to determine city street air quality, *Atmospheric Environment*, Vol. 27B, No. 4, 389-399.
- ENDLICHER, W.; LANGNER M.; DANNENMEIER, S.; FIEDLER, A.; HERRMANN, I.; OHMER, T. & DALTER, D., 2011: Einfluss innerörtlicher Grünflächen und Wasserflächen auf die PM10-Belastung, *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe V, Band 202*.
- FLORIANI, L. DE; MAGILLO, P. & PUPPO, E., 1999: Applications of Computational Geometry to Geographic Information Systems, *Handbook of computational geometry*, Elsevier Science B. V., 335-377.
- GRÖGER, G.; KOLBE, T. H.; NAGEL, C. & HÄFELE, K.H., 2012. OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 2.0.0, OGC 08-007r2.
- GROMKE C. & RUCK B., 2009: On the Impact of Trees on Dispersion Process of Traffic Emissions in Street Canyons, *Boundary-Layer Meteorol.* 131, 19-34.
- HOYDYSH, W. G. & DABBERT W. F., 1988: Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons, *Atmospheric Environment*, Vol. 22, No. 12, 2677-2689.
- KEUKEN M. & VAN DER VALK, K., 2010: The effects of trees and hedges on air quality in a street-canyon in Amsterdam, *CLIMAQS Workshop January 2010*, Antwerpen.
- LÖWNER, M.-O.; BENNER, J.; GRÖGER, G.; GRUBER, U.; HÄFELE, K.-H. & SCHLÜTER, S., 2012: CityGML 2.0 - ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle, Teil 1: Datenmodell. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 6/2012, 340 - 349.
- LÖWNER, M.-O.; CASPER, E.; BECKER, T.; BENNER, J.; GRÖGER, G.; GRUBER, U.; HÄFELE, K.-H.; KADEN, R. & SCHLÜTER, S., 2013: CityGML 2.0 - Ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle, Teil 2: CityGML in der Praxis. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 2/2013, 131-143.
- Nakamura, Y. & Oke, T. R., 1988: Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon, *Atmospheric Environment* vol. 22, No 12, 2691-2700.
- NICHOLSON, S. E., 1975: A Pollution model for street-level air, *Atmospheric Environment* **9**, 19-31.
- RAMM, F. & TOPF & J., 2010: OpenStreetMap. Die freie Weltkarte nutzen und mitgestalten. 3. Auflage. Lehmanns, Berlin.
- TIWARY A. & COLLS J., 2010: Air Pollution: Measurements, modelling and mitigation, Routledge, London and New York.
- VARDOULAKIS S.; FISHER B. E. A.; PERICLEOUS K. & GONZALEZ-FLESCA N., 2003: Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmospheric Environment* **37**, 155-182.