

Diplomarbeit

Weiterentwicklung einer Methode zur automatisierten Klassifizierung niveaugleicher Knotenpunkte im Straßennetz

eingereicht an der
Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der
Westsächsischen Hochschule Zwickau
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: cand. ing.

Irmisch, Christof

geb. am 09.12.1986

Studiengang: Kraftfahrzeugtechnik

Studienrichtung: Karosseriebau

Erstbetreuer: Prof. Dr. Klaus-Dieter Brösdorf

Zweitbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Lutz Nagel

Auftraggeber: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Externer Betreuer: M. Eng. Pascal Breitlauch, Fraunhofer IVI

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt wurde.

Chemnitz, 19.12.2023
Ort, Datum

L. Irmisch
Christof Irmisch

Autorenreferat

Eine wichtige Eigenschaft eines Verkehrsunfalls ist der Knotenpunkttyp. Deutschlandweit gibt es keine Verkehrsunfalldatenbank, die diese Eigenschaft für Verkehrsunfallanalysen bereithält. Eine Methode zur Klassifizierung von niveaugleichen Knotenpunkten existiert, jedoch sind die Erkennungsraten und die Anzahl der Knotenpunkttypen gering. In dieser Arbeit wird die Methode weiterentwickelt, um die Erkennungsraten zu erhöhen. Dazu wird ein vergrößerter Trainings- und Testdatensatz angewendet. Weitere Knotenpunkttypen werden eingeführt, verschiedene Optimierungen sowie neue Merkmale getestet und eingearbeitet. Die Anzahl der klassifizierten Knotenpunkttypen wird von fünf auf neun erhöht. Die positive Erkennungsrate steigt um 31,0 Prozent auf 88,1 Prozent, die negative um 9,4 Prozent auf 98,7 Prozent und die Korrektklassifikationsrate um 14,8 Prozent auf 97,6 Prozent. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit können Handlungsempfehlungen für fahrzeugspezifische Maßnahmen und für Maßnahmen zur Infrastruktur abgeleitet werden. Dadurch wird die Verkehrssicherheit gesteigert und die Anzahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden werden verringert. Diese Arbeit kann einen Beitrag zum Projekt „Vision Zero“ des Bundes leisten.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Bilderverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Anhangsverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
Kurzzeichenverzeichnis	XII
Glossar.....	XVI
Glossar Straßenklasse.....	XVIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Literaturstudie	1
1.1.1 Unfalldaten	2
1.1.2 Anfangszustand der bisherigen Methode zur Klassifizierung	3
1.1.2.1 Ablauf der bisherigen Methode zur Klassifizierung	3
1.1.2.2 Definition der Knotenpunkttypen	6
1.1.2.3 Merkmale der ersten und zweiten Klassifizierungsstufe.....	7
1.1.2.4 Erste Klassifizierungsstufe	11
1.1.2.5 Zweite Klassifizierungsstufe.....	12
1.1.2.6 Definition der Größe des quadratischen Suchfeldes der zweiten Klassifizierungsstufe	13
1.1.2.7 Definition der Linienbreite	13
1.1.3 Infrastruktur	14
1.1.3.1 Niveau- und teilniveaugleiche Knotenpunkte	14
1.1.3.2 Niveau- und teilniveaufreie Knotenpunkte.....	17
1.1.3.3 Konfliktpunkte.....	19
1.2 Motivation	20

1.3	Ziele und Aufgabenstellungen	20
2	Methode.....	22
2.1	Erweiterung der bisherigen Methode zur Klassifizierung auf die Region Deutschland.....	22
2.2	Einführung weiterer Knotenpunkttypen.....	23
2.2.1	Mittlere Einmündung	24
2.2.2	Große Einmündung	24
2.2.3	Mittlere 4-Straßen-Kreuzung	24
2.2.4	Fädelungspunkt	24
2.2.5	Fahrbahntrennung	25
2.3	Vergrößerung des Trainings- und Testdatensatz auf 10000 manuell klassifizierte Knotenpunkte	25
2.4	Anfangszustand der bisherigen Methode zur Klassifizierung.....	26
2.5	Zentrierung des Unfallortes um den Referenzpunkt	29
2.6	Separierung der verbundenen Fahrbahnen	30
2.7	Einführung weiterer Merkmale	33
2.7.1	Häufigkeit überlagerter Punkte	33
2.7.2	Anzahl der Straßenarme am Referenzpunkt	34
2.7.3	Größter und kleinster Winkel zwischen benachbarten Straßenarmen am Referenzpunkt	35
2.7.4	Anzahl der Gegenverkehrsstraßen und Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt	35
2.7.5	Schnittpunkte mit dem Quadrat im Rasterbild	36
2.7.6	Schnittpunkte mit dem Kreis im Rasterbild	37
2.8	Anpassung des Maximum-Likelihood-Klassifikators	39
2.9	Selektierung der Ebene des Unfallortes.....	39
2.10	Parameterbasierte Optimierungen	40
2.11	Vorentscheidungen der zweiten Klassifizierungsstufe	41

2.12	Anwendung der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung auf die Region Deutschland.....	46
2.13	Konzept zur Klassifizierung aller niveaugleichen Knotenpunkte im deutschen Straßennetz.....	46
3	Ergebnisse.....	47
3.1	Erweiterung der bisherigen Methode zur Klassifizierung auf die Region Deutschland.....	47
3.2	Übersicht der Knotenpunkttypen.....	48
3.3	Aufbau eines Trainings- und Testdatensatzes auf 10000 manuell klassifizierte Knotenpunkte	50
3.4	Anfangszustand der bisherigen Methode zur Klassifizierung.....	52
3.5	Zentrierung um den nächstgelegenen identischen Punkt.....	53
3.6	Abgrenzung der verbundenen Fahrbahnen	55
3.7	Eingeführte Merkmale.....	57
3.8	Stand der Methode zur Klassifizierung mit eingeführten Knotenpunkttypen und neu angelertem Maximum-Likelihood-Klassifikator.....	58
3.9	Separierung der Ebene des Unfallortes	60
3.10	Parameterbasierte Optimierungen.....	61
3.11	Endzustand der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung nach Einführung der Vorentscheidungen der zweiten Klassifizierungsstufe....	65
3.12	Anwendung der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung auf deutsche Unfalldaten	67
3.12.1	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Verkehrsunfälle mit Getöteten der Jahre 2020 bis 2022	67
3.12.2	Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020	69
3.12.3	Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes	70

3.13	Konzept um alle niveaugleichen Knotenpunkte im deutschen Straßennetz zu klassifizieren.....	72
4	Diskussion	74
4.1	Grenzen der Klassifizierung.....	74
4.2	Ausblick	76
5	Zusammenfassung	78
	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	80
	Anhang.....	A1

Bilderverzeichnis

Bild 1-1: Schematischer Ablauf der bisherigen Methode zur Klassifizierung (nach [5] PFITZNER).....	3
Bild 1-2: Luftbild einer beliebigen Koordinate und Bild der geometrischen Daten nach der ersten Klassifizierungsstufe (Luftbild nach [6] GOOGLE MAPS)	4
Bild 1-3: Dokumentation der zweiten Klassifizierungsstufe	5
Bild 1-4: Übersicht ausgerichteter Knotenpunkte nach der zweiten Klassifizierungsstufe (nach [5] PFITZNER, S. 11–12)	6
Bild 1-5: Verschiedene Straßen-Geometrien zur Erklärung des Merkmals „unabhängige Straßen-Geometrie“ (nach [7] BREITLAUCH, S. 6)	8
Bild 1-6: Erste Klassifizierungsstufe zur Klassifizierung von Kreisverkehr, Gerade und Kurve (nach [7] BREITLAUCH, S. 10)	11
Bild 1-7: Zweite Klassifizierungsstufe zur Klassifizierung der Knotenpunkte (nach [7] BREITLAUCH, S. 17)	12
Bild 1-8: Grundformen niveau- und teilniveaugleicher Knotenpunkte (nach [10] RAS-K-1, S. 17).....	16
Bild 1-9: Beispiele niveaufreier Knotenpunkte (nach [12] RAA, S. 48–57)	17
Bild 1-10: Verbindungsrampen bei niveaufreien Knotenpunkten (nach [13] RAL, S. 63)	18
Bild 1-11: Teilniveaufreier Knotenpunkt und typische Verbindungsrampen (nach [13] RAL, S. 57, S. 63).....	18
Bild 1-12: Übersicht der Konfliktpunkte (nach [14] BRACHER et al., S. 261).....	19
Bild 1-13: Varianten der Trennungs- und Einmündungspunkte (nach [14] BRACHER et al., S. 262).....	19
Bild 2-1: Übersicht neu eingeführter Knotenpunkte.....	23
Bild 2-2: Beispiele der Optimierung „Zentrierung“	30
Bild 2-3: Beispiele der Optimierung „Verbund“	31

Bild 2-4: Verschiedene Straßen-Geometrien zur überarbeiteten Erklärung des Merkmals „unabhängige Straßen-Geometrie“	32
Bild 2-5: Angepasste erste Klassifizierungsstufe.....	33
Bild 2-6: Merkmal „Anzahl der überlagerten Punkte“.....	34
Bild 2-7: Merkmal „Anzahl der Straßenarme“	34
Bild 2-8: Merkmal „größter und kleinster Winkel“	35
Bild 2-9: Merkmal „Anzahl der Gegenverkehrsstraßen und Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt“	36
Bild 2-10: Merkmal „Schnittpunkte mit dem Quadrat im Rasterbild“	37
Bild 2-11: Merkmal „Schnittpunkte mit dem Kreis im Rasterbild“.....	38
Bild 2-12: Veränderte zweite Klassifizierungsstufe der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung	41
Bild 2-13: Häufigkeitsverteilung des Merkmals „Anzahl der Straßenarme“	42
Bild 2-14: Häufigkeitsverteilung des Merkmals „Anzahl der Gegenverkehrsstraßen am Referenzpunkt“	43
Bild 3-1: Übersicht klassifizierbarer Knotenpunkttypen	48
Bild 3-2: Absolute Häufigkeitsverteilung der Knotenpunkttypen.....	50
Bild 3-3: Relative Häufigkeitsverteilung der Knotenpunkttypen.....	51
Bild 3-4: Absolute Häufigkeitsverteilungen der Verkehrsunfälle mit Getöteten je Knotenpunkttyp der Jahre 2020 bis 2022	67
Bild 3-5: Relative Häufigkeitsverteilungen der Verkehrsunfälle mit Getöteten je Knotenpunkttyp der Jahre 2020 bis 2022	68
Bild 3-6: Absolute Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020	69
Bild 3-7: Relative Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020	69
Bild 3-8: Absolute Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes	70

Bild 3-9: Relative Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes	71
Bild 3-10: Skizze mit Anordnung der Kacheln und Abmaße von Deutschland (Deutschlandkarte nach [21] GOOGLE MAPS)	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Erforderliche Eigenschaften zur Klassifizierung für die bisherige Methode.....	2
Tabelle 1-2: Schwellenwerte zur Klassifizierung von Gerade, Kurve und unbekanntem Knotenpunkt mit Hilfe der Anzahl von unabhängigen Straßen-Geometrien (nach [7] BREITLAUCH, S. 7).....	9
Tabelle 1-3: Definition der neuen Größe des quadratischen Suchfeldes der zweiten Klassifizierungsstufe (nach [9] BREITLAUCH)	13
Tabelle 1-4: Definition der Linienbreite (nach [9] BREITLAUCH)	14
Tabelle 2-1: Konfusionsmatrix (98 Trainingsdaten, 42 Testdaten)	27
Tabelle 2-2: Kennzahlen (98 Trainingsdaten, 42 Testdaten)	29
Tabelle 2-3: Angepasste Schwellenwerte zur Klassifizierung von Gerade, Kurve und unbekanntem Knotenpunkt unter Einbeziehung der Anzahl des Merkmals „unabhängige Straßen-Geometrie“	32
Tabelle 2-4: Definition der Eigenschaft „Level“ einer Straßen-Geometrie	39
Tabelle 2-5: Definition der angepassten quadratischen Suchfeldgröße	40
Tabelle 2-6: Definition der angepassten Linienbreite	41
Tabelle 2-7: Übersicht aller Vorentscheidungen.....	43
Tabelle 3-1: Vergleich der Klassifizierungen zwischen bisheriger und weiterentwickelter Methode	49
Tabelle 3-2: Konfusionsmatrix (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten)	52
Tabelle 3-3: Kennzahlen (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten)	52
Tabelle 3-4: Konfusionsmatrix (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten, Zentrierung)	53
Tabelle 3-5: Kennzahlen (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten, Zentrierung)	54
Tabelle 3-6: Konfusionsmatrix (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten, Zentrierung, Verbund).....	55

Tabelle 3-7: Kennzahlen (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten, Zentrierung, Verbund).....	56
Tabelle 3-8: Eingeführte Merkmale	57
Tabelle 3-9: Konfusionsmatrix (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, Maximum-Likelihood-Klassifikator).....	58
Tabelle 3-10: Kennzahlen (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, Maximum-Likelihood-Klassifikator).....	59
Tabelle 3-11: Konfusionsmatrix (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, Ebene, Maximum-Likelihood-Klassifikator)	60
Tabelle 3-12: Kennzahlen (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, Ebene, Maximum-Likelihood-Klassifikator)	61
Tabelle 3-13: Konfusionsmatrix (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, alle Optimierungen, Maximum-Likelihood-Klassifikator)	63
Tabelle 3-14: Kennzahlen (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, alle Optimierungen, Maximum-Likelihood-Klassifikator)	64
Tabelle 3-15: Konfusionsmatrix (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, alle Optimierungen, Vorentscheide, Maximum-Likelihood-Klassifikator).....	65
Tabelle 3-16: Kennzahlen (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, alle Optimierungen, Vorentscheide, Maximum-Likelihood-Klassifikator)	66

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Dokumentation der ersten Klassifizierungsstufe	A1
Anhang 2: Ansicht der blau gekennzeichneten Geodaten in OpenStreetMap (nach [5] OPENSTREETMAP GEODATEN)	A2
Anhang 3: Beispiele klassifizierbarer Knotenpunkttypen.....	A3
Anhang 4: Ansicht des Programms zur manuellen Klassifizierung der Knotenpunkte	A4
Anhang 5: Übersicht der absoluten und relativen Häufigkeit des Datensatzes	A5
Anhang 6: Konfusionsmatrix nach Anpassung der Definition des quadratischen Suchfeldes.....	A6
Anhang 7: Kennzahlen nach Anpassung der Definition des quadratischen Suchfeldes.....	A7
Anhang 8: Konfusionsmatrix nach Anpassung der Definition der Linienbreite mit 10 Pixel.....	A8
Anhang 9: Kennzahlen nach Anpassung der Definition der Linienbreite mit 10 Pixel.....	A9
Anhang 10: Konfusionsmatrix nach Anpassung der Definition der Linienbreite mit 5 Pixel.....	A10
Anhang 11: Kennzahlen nach Anpassung der Definition der Linienbreite mit 5 Pixel.....	A11
Anhang 12: Übersicht der absoluten und relativen Häufigkeiten der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020.....	A12
Anhang 13: Übersicht der absoluten und relativen Häufigkeiten der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes	A13

Abkürzungsverzeichnis

Kurzzeichen	Bedeutung
A	abhängig
I & C	kein Knotenpunkt, „I“ für gerade Straße und „C“ für kurvige Straße
IVI	Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
K	komplexer Knotenpunkt
KPT	Knotenpunkttypen
NA	not available, nicht verfügbar
O	Kreisverkehr
SPS	Spaltensumme
TL	große Einmündung
TM	mittlere Einmündung
TS	kleine Einmündung
U	unabhängig
UTM	Universal Transverse Mercator, globales Koordinatensystem zur Positionsbestimmung auf der Erde
V	Fädelpunkt
VUFO	Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH
WGS84	World Geodetic System 1984, weltweites geodätisches Referenzsystem zur Positionsbestimmung auf der Erde
XL	große 4-Straßen-Kreuzung
XM	mittlere 4-Straßen-Kreuzung
XS	kleine 4-Straßen-Kreuzung
Y	Fahrbahntrennung, kein Knotenpunkt

Kurzzeichenverzeichnis

Alle **fett** markierten Kurzzeichen sind durch [1] BREITLAUCH, S. 6–9 und [2] PFITZNER, S. 13–14 definiert.

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
<i>angle_{max}</i>	°C	größter Winkel zwischen den Straßenarmen am Referenzpunkt
<i>angle_{min}</i>	°C	kleinster Winkel zwischen den Straßenarmen am Referenzpunkt
<i>b_{peak(vertical)}</i>	-	Breite der erkannten Spitzen im vertikalen Histogramm
<i>cut_{all-site-max-circle}</i>	-	„0“ oder „1“; Wert „1“, wenn sich an jedem Kreisbogenbereich mindestens eine Straße mit dem größten Kreis schneidet
<i>cut_{all-site-max-square}</i>	-	„0“ oder „1“; Wert „1“, wenn sich an jeder Seite mindestens eine Straße mit dem größten Quadrat schneidet
<i>cut_{all-site-x-circle}</i>	-	„0“ oder „1“; Wert „1“, wenn sich an jedem Kreisbogenbereich mindestens eine Straße mit dem Kreis mit x gleich [50; 40; 30; 20; 12,5] Metern Durchmesser schneidet
<i>cut_{all-site-50-square}</i>	-	„0“ oder „1“; Wert „1“, wenn sich an jeder Seite mindestens eine Straße mit dem Quadrat mit 50 Metern Kantenlänge schneidet
<i>n_{arms}</i>	-	Anzahl der Straßenarme am Referenzpunkt
<i>n_{cut-max-circle-all}</i>	-	Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem größten Kreis
<i>n_{cut-max-circle-bottom}</i>	-	Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem unteren Kreisbogen des größten Kreises

- n_{cut-max-circle-left}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem linken Kreisbogen des größten Kreises
- n_{cut-max-circle-right}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem rechten Kreisbogen des größten Kreises
- n_{cut-max-circle-top}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem oberen Kreisbogen des größten Kreises
- n_{cut-max-square-all}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem größten Quadrat
- n_{cut-max-square-bottom}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit der unteren Seite des größten Quadrates
- n_{cut-max-square-left}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit der linken Seite des größten Quadrates
- n_{cut-max-square-right}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit der rechten Seite des größten Quadrates
- n_{cut-max-square-top}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit der oberen Seite des größten Quadrates
- n_{cut-x-circle-all}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem Kreis mit x gleich [50; 40; 30; 20; 12,5] Metern Durchmesser
- n_{cut-x-circle-bottom}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem unteren Kreisbogen mit x gleich [50; 40; 30; 20; 12,5] Metern Durchmesser
- n_{cut-x-circle-left}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem linken Kreisbogen mit x gleich [50; 40; 30; 20; 12,5] Metern Durchmesser
- n_{cut-x-circle-right}* - Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem rechten Kreisbogen mit x gleich [50; 40; 30; 20; 12,5] Metern Durchmesser

$n_{cut-x-circle-top}$	-	Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem oberen Kreisbogen mit x gleich [50; 40; 30; 20; 12,5] Metern Durchmesser
$n_{cut-50-square-all}$	-	Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit dem Quadrat mit 50 Metern Kantenlänge
$n_{cut-50-square-bottom}$	-	Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit der unteren Seite des Quadrates mit 50 Metern Kantenlänge
$n_{cut-50-square-left}$	-	Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit der linken Seite des Quadrates mit 50 Metern Kantenlänge
$n_{cut-50-square-right}$	-	Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit der rechten Seite des Quadrates mit 50 Metern Kantenlänge
$n_{cut-50-square-top}$	-	Anzahl der Schnittpunkte aller Straßen mit der oberen Seite des Quadrates mit 50 Metern Kantenlänge
$n_{identical-point-all}$	-	Anzahl ab dreifach überlagerten Punkten
$n_{identical-point-x}$	-	jeweilige Anzahl der zwei- bis sechsfach überlagerten Punkte mit x gleich [2, 3, 4, 5, 6]
$n_{identical-y}$	-	Anzahl der identischen y-Werte im horizontalen und vertikalen Histogramm
n_{max}	-	Anzahl der Maxima im horizontalen und vertikalen Histogramm
$n_{one-way}$	-	Anzahl der Einbahnstraßen oder Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt
$n_{peak(horizontal)}$	-	Anzahl der Spitzen im horizontalen Histogramm
n_{roads}	-	Anzahl der unabhängigen Straßen

$n_{two-way}$	-	Anzahl der Gegenverkehrsstraßen am Referenzpunkt
<i>ratio</i> _{area}	-	Flächenverhältnis zwischen der Fläche unterhalb der dreifachen maximalen Linienbreite und der Gesamtfläche des Histogramms
<i>ratio</i> _{peak}	-	durchschnittliches Verhältnis von Höhe zu Breite der Maxima im horizontalen und vertikalen Histogramm
<i>zero</i> _{L(vertical)}	-	„0“ oder „1“; Wert „1“ bei definierter Anzahl von Nullen neben dem letzten linken Maximum im vertikalen Histogramm
<i>zero</i> _{R(vertical)}	-	„0“ oder „1“; Wert „1“ bei definierter Anzahl von Nullen neben dem letzten rechten Maximum im vertikalen Histogramm
μ	-	Mittelwert des horizontalen und vertikalen Histogramms

Glossar

Alle **fett** markierten Begriffe sind aus [3] FGSV definiert.

Begriff	Bedeutung
Anschlussstelle	teilniveau- oder niveaufreier Knotenpunkt zum Anschluss an eine Autobahn
Ausfädelung	Bereich zum tangentialen Ausfahren aus dem Verkehrsstrom
Einfädelung	Bereich zum tangentialen Einfahren in einen Verkehrsstrom
Fahrbahn	besteht aus Fahrstreifen und Randstreifen einer Straße
Fahrstreifen	markierter Teil einer Fahrbahn, der für eine Fahrzeugreihe bestimmt ist
Gegenverkehrsstraße	Straße mit Verkehr in beide Richtungen ohne bauliche Trennung
Konfliktpunkt	Kreuzungspunkt, Einfädelungspunkt oder Ausfädelungspunkt
Knotenpunkt	bauliche Anlage zur Verknüpfung des Straßenverkehrs
OpenStreetMap	Projekt mit frei verfügbaren Geodaten
OpenStreetMap Wiki	Wissensdatenbank von OpenStreetMap
Point of Interest	besondere Geodaten auf der Karte
Referenzdaten	Datensatz mit manuell klassifizierten Knotenpunkten
Richtungsfahrbahn	Verkehr nur in eine Fahrtrichtung und baulich von anderen Fahrbahnen getrennt
Straße, einbahnig	keine bauliche Trennung aller Fahrspuren

Straße, zweibahnig	Fahrspuren mit gleicher Verkehrsrichtung sind verbunden und ergeben eine Richtungsfahrbahn, die zweite Richtungsfahrbahn ist baulich getrennt und die Verkehrsrichtung verläuft in die entgegengesetzte Richtung
Straße, zweistreifig	Fahrbahn mit zwei Fahrstreifen
Straßennetz	Straßen und deren Knotenpunkte
Testdatensatz	Datensatz zur Berechnung der Kennzahlen der Methode zur Klassifizierung
Trainingsdatensatz	Analyse des Datensatzes zur Entwicklung der Vorentscheidungen; Anlernen des Maximum-Likelihood-Klassifikators
Verbindungsrampe	Fahrbahn zur Verbindung zweier Straßen, die sich in unterschiedlichen Ebenen kreuzen
Verkehrsstrom	in gleiche Richtung bewegender Verkehr auf einer Straße

Glossar Straßenklasse

Alle Straßenklassen sind durch [4] OPENSTREETMAP WIKI definiert und nur für die Region Deutschland gültig.

Straßenklasse	Bedeutung
bridleway	Reitweg
cycleway	Radweg
footway	Fußweg
living_street	verkehrsberuhigter Bereich, umgangssprachlich auch als Spielstraße bezeichnet
motorway	Autobahn, Straße mit baulich getrennten Fahrbahnen
motorway_link	Anschlussstelle oder Verbindungsrampe an eine Autobahn
path	Wanderweg
pedestrian	Weg, Platz oder Straße nur für Fußgänger
platform	Bussteig einer Haltestelle
primary	Bundesstraße, Straße zur Verbindung von Zentren
primary_link	Anschlussstelle an eine Bundesstraße
proposed	geplante Straße
raceway	Rennstrecke
residential	Straße an und in Wohngebieten
road	bisher nicht klassifizierte Straßenklasse
secondary	Landes- oder große Kreisstraße, Straße zur Verbindung von kleinen Zentren
secondary_link	Auf- oder Abfahrt in Landes- oder großen Kreisstraßen
service	Erschließungsweg, z.B. zu Gebäuden, zu oder innerhalb von Parkplätzen
steps	Treppen

tertiary	Kreisstraße, verbindet Dörfer miteinander
tertiary_link	Auf- oder Abfahrt in Kreisstraßen
track	Wirtschafts-, Feld- oder Waldweg
trunk	autobahnähnliche Straße, umgangssprachlich auch als Schnellstraße bezeichnet
trunk_link	Anschlussstelle oder Verbindungsrampe an eine Schnellstraße
unclassified	kleine Kreisstraße
via ferrata	Klettersteig

1 Einleitung

Im Jahr 2022 gab es in Deutschland 287752 polizeilich registrierte Verkehrsunfälle mit Personenschaden. Insgesamt zählt die Statistik 361441 verletzte Personen, darunter sind 57306 Schwerverletzte und 2776 Getötete. [1] DESTATIS

Um die Anzahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden, insbesondere die Verkehrsunfälle mit schwerverletzten oder getöteten Personen zu verringern, muss die Fahrzeug- und Verkehrssicherheit erhöht werden. Hierzu ist das Verständnis des Unfallhergangs im Rahmen der Verkehrsunfallforschung von großer Bedeutung. Für die Verkehrsunfallforschung sind alle spezifischen Charakteristika eines Verkehrsunfalls wichtig. Die Polizei oder externe Firmen wie beispielsweise die Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden „VUFO“ erheben viele allgemeine Daten von Verkehrsunfällen. Um Verkehrsunfälle bestmöglich zu analysieren, werden Daten der Infrastruktur benötigt. Eine wichtige Eigenschaft ist der Standort eines Verkehrsunfalls. Um den Unfallhergang an verschiedenen Knotenpunkttypen zu verstehen, muss der Knotenpunkttyp erhoben oder nachcodiert werden. Diese Information ist bislang in keiner deutschen Verkehrsunfalldatenbank hinterlegt. Die im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelte Methode zur automatisierten Klassifizierung von niveaugleichen Knotenpunkten im Straßennetz soll dieses Informationsdefizit beseitigen. Die Ergebnisse können sowohl für fahrzeugspezifische Maßnahmen als auch für Maßnahmen zur Infrastruktur genutzt werden, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen und um die Anzahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden zu verringern. Damit kann diese Arbeit einen wichtigen Schritt für das Projekt „Vision Zero“ des Bundes leisten [2] BMVI.

1.1 Literaturstudie

Unter diesem Kapitelabschnitt werden theoretische Grundlagen erläutert, die zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Begonnen wird mit der Einführung der Unfalldaten. Anschließend wird der Anfangszustand der bisherigen Methode zur Klassifizierung beschrieben und letztlich wird die Theorie zur Infrastruktur erklärt.

1.1.1 Unfalldaten

Die Daten der Verkehrsunfälle dienen als Grundlage für statistische Auswertungen sowie für die bisherige Methode zur automatisierten Klassifizierung von niveaugleichen Knotenpunkten im Straßennetz, künftig verkürzt als bisherige Methode zur Klassifizierung bezeichnet. Für diese Arbeit war es wichtig, frei verfügbare Datensätze von Verkehrsunfällen zu verwenden. Daher wird im Folgenden die Datenquelle „Unfallatlas Deutschland“ genutzt. In diesem Statistikportal sind polizeilich gemeldete Verkehrsunfälle aus ganz Deutschland hinterlegt. Unter der Rubrik „Unfallatlas und OpenData“ im Downloadbereich sind die Verkehrsunfälle ab 2016 abrufbar. Im Jahr 2016 hat die Erfassung der Daten der Verkehrsunfälle von sieben Bundesländern begonnen. Seit 2020 werden die Daten der Verkehrsunfälle der gesamten Region Deutschland in das Statistikportal eingepflegt. Für diese Arbeit werden die Datensätze von den Jahren 2020 bis 2022 verwendet. Jeder registrierte Verkehrsunfall ist mit 24 Eigenschaften im Datensatz verknüpft. Zu den Eigenschaften gehören u.a.: laufende Nummer des Unfalls, Bundesland, Unfallstunde, Wochentag, Unfallkategorie, Unfallart, Unfalltyp, Lichtverhältnisse, Straßenzustand und Geokoordinaten. Alle Eigenschaften und deren Erläuterungen sind unter [3] UNFALLATLAS abrufbar. [4] UNFALLATLAS

Tabelle 1-1: Erforderliche Eigenschaften zur Klassifizierung für die bisherige Methode

Unfallnummer	Breitengrad	Längengrad	Land
1234567890	50.715026	12.500560	Deutschland

Tabelle 1-1 zeigt die vier Eigenschaften eines Verkehrsunfalls, welche für die bisherige Methode zur Klassifizierung benötigt werden. Die Unfallnummer dient der eindeutigen Zuordnung aller Ergebnisse. Die Eigenschaften Breitengrad und Längengrad sind im Format Dezimalgrad des Referenzsystems WGS84 erforderlich und geben den Koordinatenursprung des Verkehrsunfalls an. Die Unfallregion ordnet den Verkehrsunfall einem Land zu.

1.1.2 Anfangszustand der bisherigen Methode zur Klassifizierung

In diesem Unterkapitel wird der Ablauf der bisherigen Methode zur Klassifizierung erklärt. Anschließend werden die verwendeten Knotenpunkttypen, die Merkmale, die erste und zweite Klassifizierungsstufe und wichtige Parameter beschrieben.

1.1.2.1 Ablauf der bisherigen Methode zur Klassifizierung

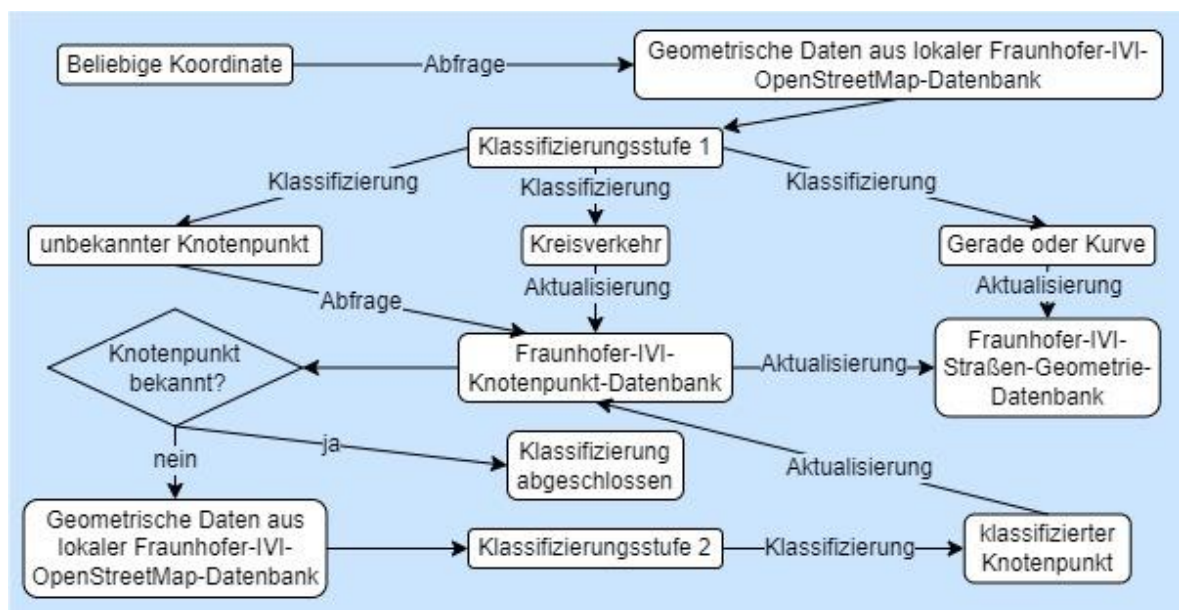


Bild 1-1: Schematischer Ablauf der bisherigen Methode zur Klassifizierung (nach [5] PFITZNER)

Bild 1-1 zeigt den schematischen Ablauf der bisherigen Methode zur Klassifizierung und wird im Folgenden erläutert. Anfangszustand ist eine beliebige Koordinate eines Verkehrsunfalls aus einem vorher festgelegten Bundesland. Die Bearbeitung von Datensätzen mit Verkehrsunfällen aus unterschiedlichen Bundesländern ist nicht möglich. Aus der lokalen OpenStreetMap-Datenbank werden zuerst die geometrischen Straßen-Daten, die innerhalb eines definierten quadratischen Suchfeldes liegen oder dieses schneiden, importiert. Dies beinhaltet alle Straßenklassen außer: *bridleway*, *cycleway*, *footway*, *path*, *pedestrian*, *platform*, *proposed*, *raceway*, *steps* und *via ferrata*. Die bisherige Methode zur Klassifizierung durchläuft die erste Klassifizierungsstufe. Eine gerade Straße, eine kurvige Straße oder ein Kreisverkehr werden direkt klassifiziert und mit lokalen Datenbanken verglichen. Fehlende Daten werden in die lokalen Datenbanken eingepflegt. Wird ein unbekannter Knotenpunkt identifiziert, erfolgt über diesen eine Abfrage in einer lokalen Knotenpunkt-Datenbank. Ist der Knotenpunkt darin hinterlegt, wird die

Klassifizierung beendet, anderenfalls erfolgt eine erneute Abfrage der geometrischen Daten aus der lokalen OpenStreetMap-Datenbank. Die Größe des quadratischen Suchfeldes der zu importierenden Daten ist hierbei abhängig von den Straßenklassen. Es folgt die zweite Klassifizierungsstufe. Einmündungen, 4-Straßen-Kreuzungen, große 4-Straßen-Kreuzungen und komplexe Knotenpunkte werden klassifiziert. Abschließend wird der klassifizierte Knotenpunkt in die lokale Knotenpunkt-Datenbank eingefügt. Anhand eines Beispiels wird die bisherige Methode zur Klassifizierung im Folgenden detailliert vorgestellt. [5] PFITZNER, S. 6–11

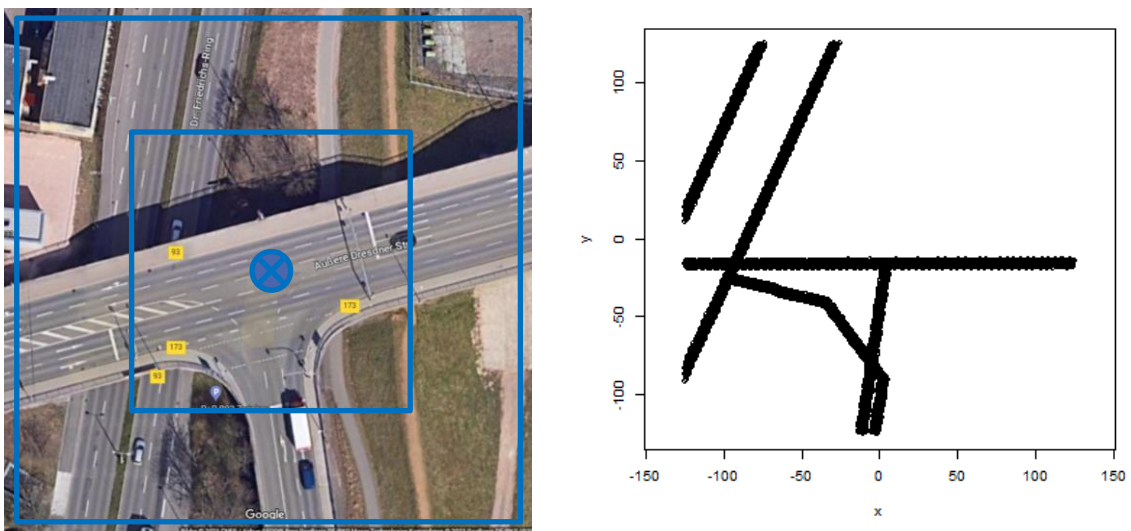


Bild 1-2: Luftbild einer beliebigen Koordinate und Bild der geometrischen Daten nach der ersten Klassifizierungsstufe (Luftbild nach [6] GOOGLE MAPS)

Bild 1-2 zeigt links das Luftbild einer beliebigen Position eines Verkehrsunfalls. Dieser ist im Mittelpunkt dargestellt. Das kleine blaue quadratische Suchfeld hat eine Kantenlänge von 50 Metern und das große blaue quadratische Suchfeld eine Kantenlänge von 90 Metern. In Bild 1-2 ist rechts ein Bild, auch Rasterbild genannt, der ersten Klassifizierungsstufe dargestellt. Dieses zeigt alle importierten Straßen des quadratischen Suchfeldes mit der Kantenlänge von 50 Metern des Luftbildes aus dem linken Bild. Im Anhang 1 auf Seite A1 befindet sich die komplette Dokumentation der ersten Klassifizierungsstufe. Die geometrischen Daten werden für eine standardisierte Auswertung um den Koordinatenursprung bis zu der Position gedreht, die der horizontalen Ausrichtung der längsten geraden Straße entspricht. Nicht ersichtlich ist, wie viele Spuren eine Straße besitzt und in welche

Richtung die Verkehrsströme fließen. Der noch unbekannte Knotenpunkt ist nicht in der Knotenpunkt-Datenbank vorhanden, deshalb erfolgt die zweite Klassifizierungsstufe. [5] PFITZNER, S. 6–11

In Bild 1-3 ist die Dokumentation der zweiten Klassifizierungsstufe dargestellt. Rechts oben zeigt das Rasterbild die gedrehten importierten geometrischen Daten des quadratischen Suchfeldes mit einer Kantenlänge von 90 Metern des Luftbildes aus dem Bild 1-2 auf Seite 4. Die Linienbreiten sind abhängig von den Straßenklassen. Links oben befindet sich das dazugehörige vertikale Histogramm, rechts unten das dazugehörige horizontale Histogramm. Mit Hilfe der Histogramme werden Merkmale zur Klassifizierung definiert. Das Kontrollbild wird unten links mit originaler Ausrichtung dargestellt. Jede farbige Linie entspricht einem Straßen-Segment. Der rote Punkt kennzeichnet die Position des Verkehrsunfalls und der schwarze Punkt den Referenzpunkt. In der Mitte der Dokumentation steht das Ergebnis der Klassifizierung der bisherigen Methode. [5] PFITZNER, S. 6–11

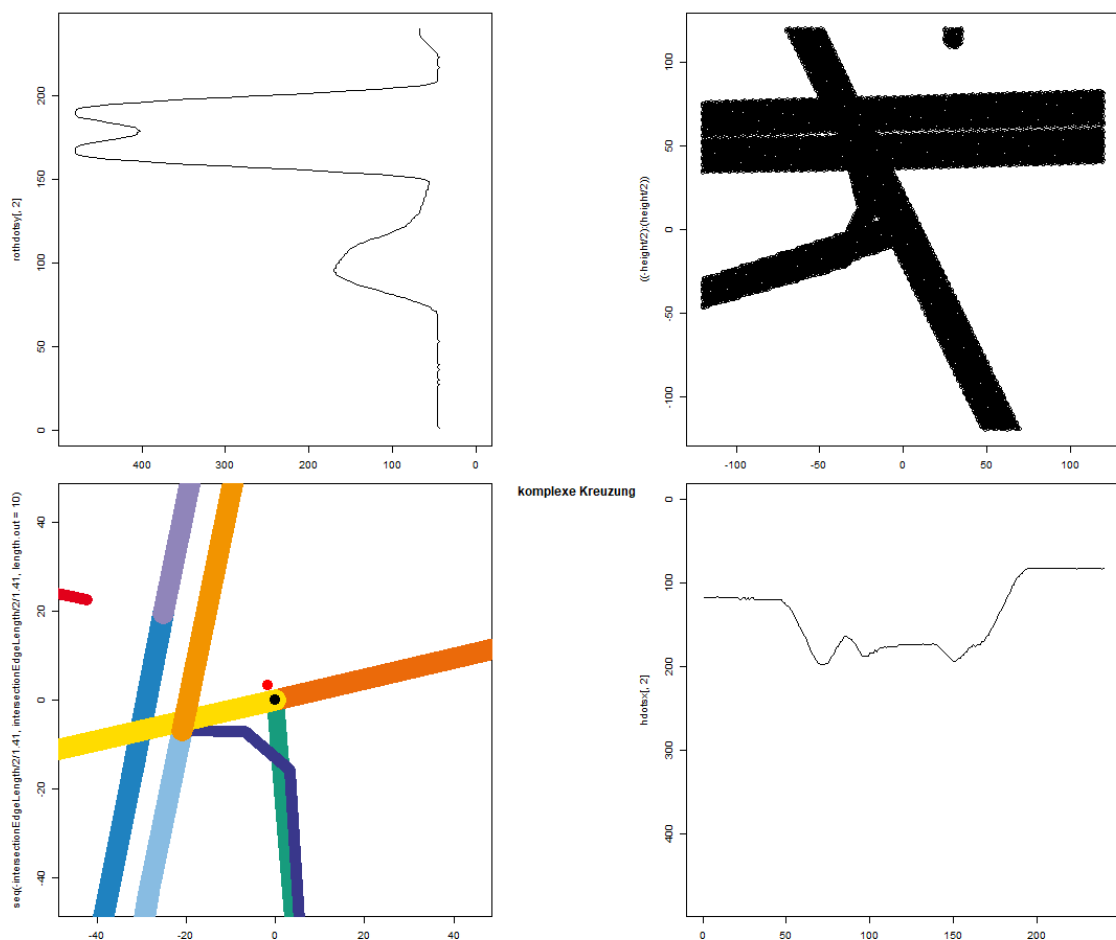


Bild 1-3: Dokumentation der zweiten Klassifizierungsstufe

Die bisherige Methode zur Klassifizierung hat nach den Vorentscheidungen und anschließendem Maximum-Likelihood-Klassifikator den unbekanntem Knotenpunkt als komplexen Knotenpunkt klassifiziert. Das Ergebnis wird in die lokale Knotenpunkt-Datenbank eingepflegt und die Klassifizierung ist abgeschlossen. [5] PFITZNER, S. 6–11

1.1.2.2 Definition der Knotenpunkttypen

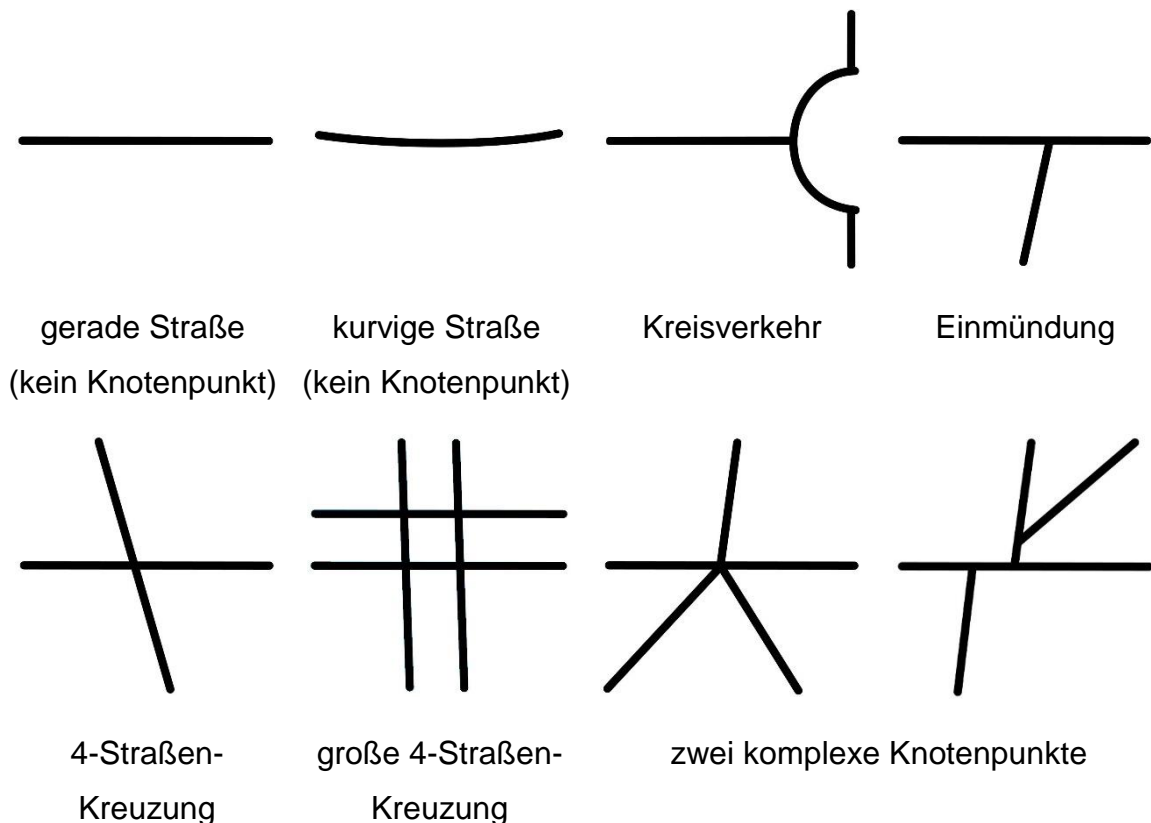


Bild 1-4: Übersicht ausgerichteter Knotenpunkte nach der zweiten Klassifizierungsstufe (nach [5] PFITZNER, S. 11–12)

Bild 1-4 zeigt alle klassifizierbaren Knotenpunkttypen. Jede Linie in dem Bild entspricht einer Gegenverkehrsstraße oder einer Richtungsfahrbahn mit beliebiger Anzahl an Fahrspuren. Die Fahrtrichtung und die Anzahl der Fahrspuren sind visuell nicht erkennbar. Im Folgenden werden die Knotenpunkttypen aus Bild 1-4 erläutert. [5] PFITZNER, S. 11–12

Gerade Straße: Eine gerade Linie entspricht einer geraden Straße.

Kurvige Straße: Eine gekrümmte Linie stellt eine kurvige Straße dar.

Kreisverkehr: Der Kreisverkehr wird durch einen Halbkreis oder Kreis mit wegführenden Linien repräsentiert.

Einmündung: Eine Einmündung ist ein Knotenpunkt, an dem eine einbahnige Straße mit beliebigem Winkel in eine andere einbahnige Straße mündet.

4-Straßen-Kreuzung: Das Merkmal einer 4-Straßen-Kreuzung ist, dass sich zwei einbahnige Straßen mit einem beliebigen Winkel kreuzen.

Große 4-Straßen-Kreuzung: Das Merkmal einer großen 4-Straßen Kreuzung ist, dass sich zwei zweibahnige Straßen mit beliebigem Winkel kreuzen.

Komplexer Knotenpunkt: Ein komplexer Knotenpunkt ist als Kreuzungspunkt mit fünf wegführenden Straßen dargestellt. Ein anderer komplexer Knotenpunkt zeigt mehrere einmündende Straßen in geringen Abständen. Zusätzlich werden alle nicht eindeutig klassifizierbaren Knotenpunkte als komplexe Knotenpunkte eingeordnet.

1.1.2.3 Merkmale der ersten und zweiten Klassifizierungsstufe

Einige Merkmale werden mit Hilfe eines vertikalen und horizontalen erstellten Histogramms definiert. [7] BREITLAUCH, S. 7

Merkmal n_{roads}

Merkmal n_{roads} entspricht der Anzahl unabhängiger Straßen-Geometrien.

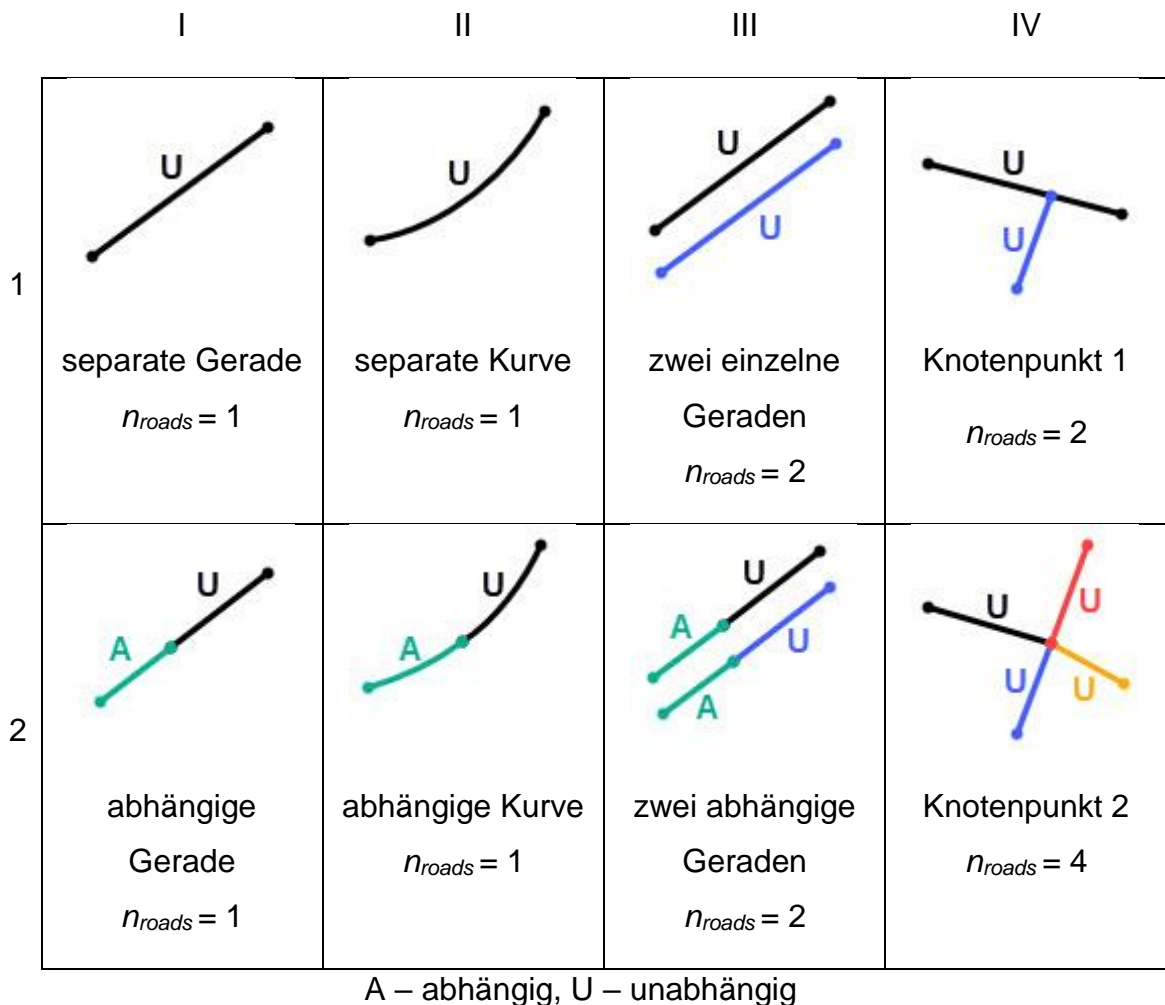


Bild 1-5: Verschiedene Straßen-Geometrien zur Erklärung des Merkmals „unabhängige Straßen-Geometrie“ (nach [7] BREITLAUCH, S. 6)

Bild 1-5 zeigt die Unterschiede der abhängigen und unabhängigen Straßen-Geometrien. Alle abhängigen Straßen-Segmente sind in grün dargestellt und die unabhängigen Straßen-Segmente in einer anderen Farbe. Eine Straße kann nach dem Importieren aller Straßen-Geometrien aus einer beliebigen Anzahl an Straßen-Segmenten bestehen. Das erste Straßen-Segment einer Straße wird immer als unabhängige Straßen-Geometrie bestimmt. I1 und II1 in Bild 1-5 zeigen jeweils eine Straßen-Geometrie aus einem Straßen-Segment, I2 und II2 bilden sich aus jeweils zwei Straßen-Segmenten. Weiterhin sind verschiedene Varianten dargestellt, welche die Unterschiede des Merkmals n_{roads} aufzeigen. Die bisherige Methode zur Klassifizierung kann über ein Berechnungsverfahren erkennen, welche abhängigen Straßen-Segmente und zugeordnete unabhängigen Straßen-Segmente zusammengehören. [7] BREITLAUCH, S. 6

In der Tabelle 1-2 werden die Schwellenwerte des Merkmals n_{roads} für die erste Klassifizierungsstufe vorgestellt. In der Praxis hat sich gezeigt, dass auch drei unabhängige Geraden vorkommen können. Infolgedessen und aus dem Bild 1-5 auf Seite 8 ergeben sich zwei Schwellenwerte. [7] BREITLAUCH, S. 6–7

Tabelle 1-2: Schwellenwerte zur Klassifizierung von Gerade, Kurve und unbekanntem Knotenpunkt mit Hilfe der Anzahl von unabhängigen Straßen-Geometrien (nach [7] BREITLAUCH, S. 7)

Merkmal n_{roads} Anzahl unabhängiger Straßen-Geometrien	1	$2 \leq n_{roads} \leq 3$	≥ 4
Straßen-Geometrie	Gerade, Kurve	Gerade, Kurve, unbekannter Knotenpunkt	unbekannter Knotenpunkt

Wird eine unabhängige Straßen-Geometrie gezählt, ist die Straßen-Geometrie eine Gerade oder Kurve. Ab vier ermittelten unabhängigen Straßen-Geometrien ist diese ein unbekannter Knotenpunkt. Für die Werte dazwischen kann anhand dieses Merkmals keine genaue Aussage getroffen werden. [7] BREITLAUCH, S. 6–7

Merkmal $n_{peak(horizontal)}$

Das Merkmal n_{peak} beschreibt die Anzahl der Spitzen im horizontalen Histogramm. Vom Übersteigen der Werte des 1,3-fachen Mittelwertes im Histogramm bis zum erneuten Erreichen des 1,3-fachen Mittelwertes wird als eine Spitze gezählt. [7] BREITLAUCH, S. 8

Merkmal $b_{peak(vertical)}$

Merkmal $b_{peak(vertical)}$ hinterlegt die Werte als Vektor. Das Merkmal beschreibt die Breiten aller erkannten Spitzen im vertikalen Histogramm. Die Breite der Spitze wird in einer Höhe des 1,5-fachen Mittelwertes gemessen. Ab dem Wert des 1,5-fachen Mittelwertes im Histogramm bis zum erneuten Absinken des 1,5-fachen Mittelwertes entspricht dies einer Spitze. [7] BREITLAUCH, S. 9

Merkmal n_{max}

Merkmal n_{max} dokumentiert die Anzahl der lokalen Maxima im horizontalen und vertikalen Histogramm. Ein komplexes Berechnungsverfahren macht es möglich dieses Merkmal zu bestimmen und die Anzahl der Maxima im Histogramm zu zählen. Mit der Erweiterung des Index „horizontal“ nimmt das Merkmal nur auf das

horizontale Histogramm Bezug. Mit der Indexierung „vertical“ bezieht sich das Merkmal nur auf das vertikale Histogramm. [5] PFITZNER, S. 13

Merkmal $ratio_{peak}$

Das Verhältnis von Höhe zu Breite eines lokalen Maximums im horizontalen und vertikalen Histogramm entspricht dem Merkmal $ratio_{peak}$. Die Höhe wird von der Achse des Koordinatensystems des Histogramms gemessen. Bei mehreren Maxima wird ein Mittelwert aus diesen bestimmt. [5] PFITZNER, S. 13

Merkmal μ

Das Merkmal μ ist der Mittelwert des horizontalen und vertikalen Histogramms und ein Maß für die Anzahl der Punkte im Rasterbild der zweiten Klassifizierungsstufe, welches zur Darstellung und Klassifizierung eines Knotenpunktes verwendet wird. [5] PFITZNER, S. 14

Merkmal $n_{identical-point-all}$

Merkmal $n_{identical-point-all}$ zählt die Anzahl mit mindestens dreifach überlagerten Punkten der Straßen-Geometrien. [7] BREITLAUCH, S. 15

Merkmal $n_{identical-y}$

Das Merkmal $n_{identical-y}$ beschreibt wie häufig ein y-Wert im horizontalen und vertikalen Histogramm dem vorherigen ähnelt. [7] BREITLAUCH, S. 15

Merkmal $ratio_{area}$

Merkmal $ratio_{area}$ entspricht dem prozentualen Anteil der Fläche unterhalb der dreifachen maximalen Linienbreite in Bezug auf die gesamte Fläche des Histogramms. [5] PFITZNER, S. 14

Merkmale $zero_{L(vertical)}$ und $zero_{R(vertical)}$

Die Merkmale $zero_{L(vertical)}$ und $zero_{R(vertical)}$ haben einen logischen Ergebnischarakter, denn die Parameter können nur die Zahlen „0“ oder „1“ annehmen. Merkmal $zero_{L(vertical)}$ entspricht der Aussage der linken Seite und Merkmal $zero_{R(vertical)}$ entspricht der Aussage der rechten Seite. Die Methode zur Klassifizierung prüft, ob links oder rechts neben dem letzten Maximum im vertikalen Histogramm 40 Werte den Wert „0“ annehmen. Sind 40 Werte „0“, nimmt der jeweilige Parameter den Wert „1“ an. [5] PFITZNER, S. 14

1.1.2.4 Erste Klassifizierungsstufe

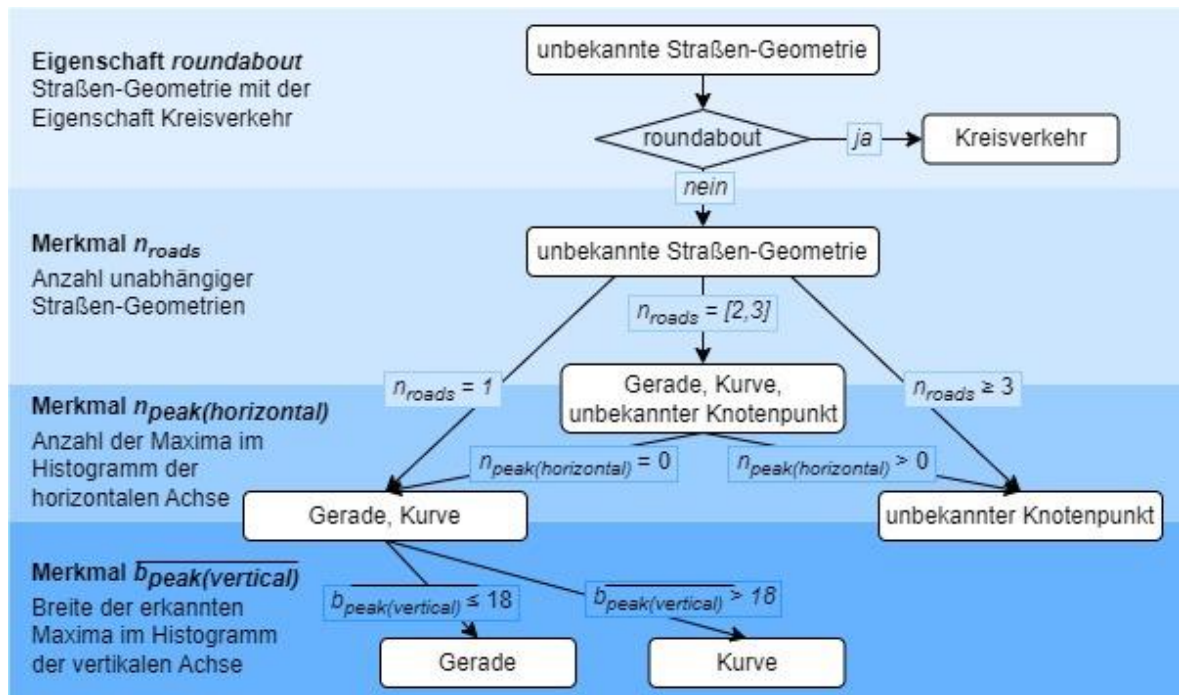


Bild 1-6: Erste Klassifizierungsstufe zur Klassifizierung von Kreisverkehr, Gerade und Kurve (nach [7] BREITLAUCH, S. 10)

Bild 1-6 zeigt schematisch die erste Klassifizierungsstufe. Im ersten Schritt wird der Kreisverkehr erkannt. Besitzt ein importiertes Straßen-Segment die Eigenschaft „roundabout“, dann wird der Knotenpunkt als Kreisverkehr klassifiziert. Anhand der Merkmale $n_{peak(horizontal)}$, n_{roads} , $b_{peak(vertical)}$ und den festgelegten Schwellenwerten werden weitere Entscheidungen zur Klassifizierung getroffen. Somit wird die unbekannte Straßen-Geometrie als gerade Straße, kurvige Straße oder unbekannter Knotenpunkt klassifiziert. Der weitere Ablauf wird in Bild 1-1 auf Seite 3 dargestellt. [7] BREITLAUCH, S. 10)

1.1.2.5 Zweite Klassifizierungsstufe

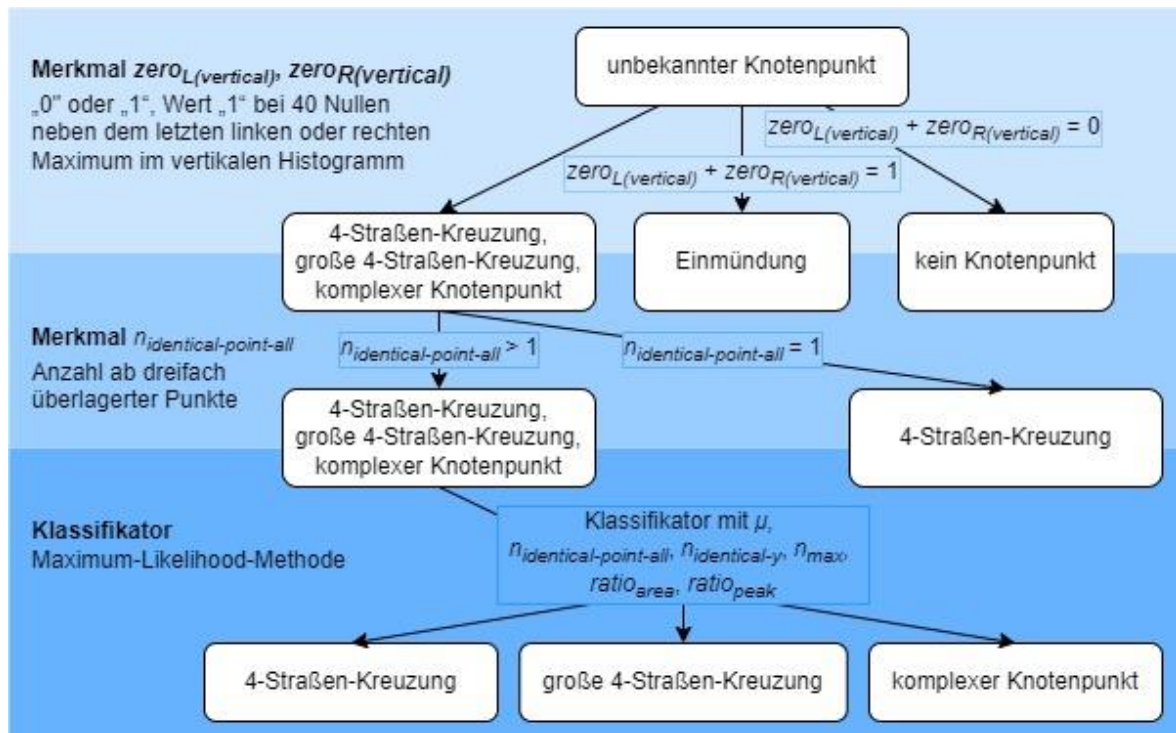


Bild 1-7: Zweite Klassifizierungsstufe zur Klassifizierung der Knotenpunkte
 (nach [7] BREITLAUCH, S. 17)

In Bild 1-7 wird die zweite Klassifizierungsstufe der Methode zur Klassifizierung gezeigt. Durch die Merkmale $zero_L(vertical)$, $zero_R(vertical)$, $n_{identical-point-all}$ und deren Schwellenwerte werden Einmündungen, die Klasse „kein Knotenpunkt“ und 4-Straßen-Kreuzungen klassifiziert. Anschließend schätzt der Maximum-Likelihood-Klassifikator den Knotenpunkttyp für die noch unbekannt Knotenpunkte. [7] BREITLAUCH, S. 17

Der Maximum-Likelihood-Klassifikator berechnet für jeden unbekannt Knotenpunkt, mit welchen Wahrscheinlichkeiten dieser zu den möglichen Knotenpunkttypen gehört. Anhand der höchsten Wahrscheinlichkeit wird der Knotenpunkttyp definiert. Zuvor muss der Maximum-Likelihood-Klassifikator angelernt werden. Der Klassifikator berechnet aus den Trainingsdaten die Standardnormalverteilungen der Merkmale für jeden Knotenpunkttyp. Die Entscheidung des Klassifikators ergibt sich aus einem statistischen Verfahren, dass auf Grundlage der Maximum-Likelihood-Methode beruht. Diese besagt, dass das Objekt zu der Gruppe zählt, welche die größte Wahrscheinlichkeit besitzt, dieser Gruppe anzugehören. Der Klassifikator wurde mit 500 Trainingsdaten angelernt und

verwendet die Merkmale μ , $n_{\text{identical-point-all}}$, $n_{\text{identical-y}}$, n_{max} , $\text{ratio}_{\text{area}}$, $\text{ratio}_{\text{peak}}$ zur Klassifizierung der 4-Straßen-Kreuzung, der großen 4-Straßen-Kreuzung und dem komplexen Knotenpunkt. Die weitere Durchführung wird in Bild 1-1 auf Seite 3 gezeigt. [8] RICHARDS, S. 267

1.1.2.6 Definition der Größe des quadratischen Suchfeldes der zweiten Klassifizierungsstufe

Nach der ersten Klassifizierungsstufe wird vor der erneuten Abfrage der geometrischen Daten aus der lokalen OpenStreetMap-Kartendatenbank die neue Kantenlänge des quadratischen Suchfeldes anhand der Straßenklasse definiert.

Tabelle 1-3: Definition der neuen Größe des quadratischen Suchfeldes der zweiten Klassifizierungsstufe (nach [9] BREITLAUCH)

Straßenklasse	Definition der Kantenlänge des quadratischen Suchfeldes [m]
primary, primary_link, trunk, trunk_link	90
secondary, secondary_link	80
tertiary, tertiary_link	70
living_street, motorway, motorway_link, residential, road, service, track, unclassified	50
alle anderen Straßenklassen	80

Tabelle 1-3 zeigt die Definition der Straßenklasse und der zugehörigen Kantenlänge des quadratischen Suchfeldes. Die Methode zur Klassifizierung verknüpft die Straßenklasse mit den Werten aus der Tabelle 1-3, woraufhin die Kantenlänge des neuen quadratischen Suchfeldes durch den größten vorhandenen Wert definiert wird. [9] BREITLAUCH

1.1.2.7 Definition der Linienbreite

Im nächsten Schritt werden die Linienbreiten für jede Straßenklasse bestimmt. Die unterschiedlichen Linienbreiten sind in Bild 1-3 auf Seite 5 im Raster- und Kontrollbild ersichtlich. Die Definition der Linienbreiten der Straßen-Geometrien wird in Tabelle 1-4 auf Seite 14 gezeigt.

Tabelle 1-4: Definition der Linienbreite (nach [9] BREITLAUCH)

Straßenklasse	Linienbreite [Pixel]	Straßenklasse	Linienbreite [Pixel]
motorway	25	motorway_link	20
trunk	23	trunk_link	19
primary	21	primary_link	17
secondary	19	secondary_link	17
tertiary	15	tertiary_link	15
unclassified	13	road	13
residential	13	living_street	13
service	11	track	9
alle anderen Straßenklassen	10		

Bevor das Raster- und Kontrollbild erstellt wird, werden alle Straßen-Geometrien aus der neu definierten Größe des quadratischen Suchfeldes, wie in Kapitel 1.1.2.6 auf Seite 13 beschrieben, importiert. Anhand der Straßenklasse wird nach Tabelle 1-4 die Linienbreite für jede Straße definiert. [9] BREITLAUCH

1.1.3 Infrastruktur

Unter diesem Kapitelabschnitt werden die vier grundlegenden Knotenpunktkategorien erläutert. Im Anschluss werden die Konfliktpunkte und deren Einteilungen beschrieben.

1.1.3.1 Niveau- und teilniveaugleiche Knotenpunkte

Ein niveaugleicher Knotenpunkt ist dadurch charakterisiert, dass die Verkehrsströme der unterschiedlichen Straßen in gleicher Ebene aufeinandertreffen und sich kreuzen. Teilniveaugleiche Knotenpunkte haben die Eigenschaft, dass sich die Verkehrsströme der unterschiedlichen Straßen in verschiedenen Ebenen kreuzen. Für die Verbindung der Straßen untereinander werden sogenannte Verbindungsrampen verwendet, die den Niveauunterschied ausgleichen. Weitere

Merkmale sind, dass beide Anschlüsse der Verbindungsrampe als niveaugleiche Teilknotenpunkte ausgelegt sind. [10] RAS-K-1, S. 16–18

In Bild 1-8 auf Seite 16 sind die sieben Grundformen der niveau- und teilniveaugleichen Knotenpunkte dargestellt. Alle Grundformen bis auf Grundform IV sind niveaugleich. Zusätzlich sind die Grundformen in Einmündungen und Kreuzungen gegliedert. Grundform I als Einmündung bedeutet, dass eine zweistreifige Straße in eine andere zweistreifige Straße mündet. Bei einer Kreuzung hingegen kreuzen sich zwei zweistreifige Straßen. Grundform II baut auf Grundform I auf. Hierbei sind bei der Einmündung und auch bei der Kreuzung eine übergeordnete Straße zweibahnig und die andere untergeordnete Straße nur zweistreifig. Grundform III zeigt in Bild 1-8 auf Seite 16, dass alle Straßen bei der Einmündung und bei der Kreuzung zweibahnig sind. Grundform IV stellt einen teilniveaugleichen Knotenpunkt dar. Zweistreifige oder zweibahnige Straßen kreuzen sich in unterschiedlichen Ebenen. Die Verbindungsrampe ist eine einstreifige Fahrbahn und verknüpft beide Straßen miteinander. Wie in Bild 1-8 auf Seite 16 dargestellt wird, erfolgt der jeweilige Anschluss mit einer Einmündung. Ein Anschluss als Kreuzung oder Kreisverkehr ist möglich. Grundform V zeigt den Knotenpunkttyp „Kreuzung mit Versatz“. Dieser Knotenpunkttyp zeichnet sich durch zwei zweistreifige Straßen aus, die in geringem Abstand zueinander von unterschiedlichen Seiten in eine übergeordnete Straße einmünden. Grundform VI zeigt eine aufgeweitete Einmündung und Kreuzung. Diese Grundform basiert auf den Grundformen II und III. Entweder ist eine Straße zweibahnig oder beide Straßen sind zweibahnig. Der Unterschied liegt darin, dass im mittleren Bereich mindestens eine Fahrzeuglänge Platz für den abbiegenden oder den einbiegenden Verkehr ist. Eine Verkehrsinsel ist möglich. Die letzte Grundform VII in Bild 1-8 auf Seite 16 stellt einen Kreisverkehr für Einmündungen und Kreuzungen dar. Bei der Einmündung ist ein Kreisverkehr mit allen Straßen als zweibahnig dargestellt. Bei dem Kreisverkehr als Kreuzung sind alle Straßen zweistreifig. [10] RAS-K-1, S. 16–18

Grundform	Einmündungen	Kreuzungen
I Einmündung oder Kreuzung von 2-streifigen Straßen		
II Einmündung oder Kreuzung von zweibahnigen mit zweistreifigen Straßen in der Regel mit Lichtsignalanlage		
III Einmündung oder Kreuzung von zwei zweibahnigen Straßen mit Lichtsignalanlage		
IV Teilniveaugleicher Knotenpunkt von zweistreifigen oder zweibahnigen Straßen	-	
V Kreuzung zweistreifiger Straßen als Versatz	-	
VI Aufgeweitete Einmündung oder Kreuzung mit mindestens einer zweibahnigen Straße		
VII Kreisverkehr an zweibahnigen oder zweistreifigen Straßen		

Bild 1-8: Grundformen niveau- und teilniveaugleicher Knotenpunkte (nach [10] RAS-K-1, S. 17)

1.1.3.2 Niveau- und teilniveaufreie Knotenpunkte

Niveau- und teilniveaufreie Knotenpunkte haben das gemeinsame Merkmal, dass sich die Verkehrsströme der unterschiedlichen Straßen in verschiedenen Ebenen kreuzen. Für die Verknüpfung der Straßen werden Verbindungsrampen verwendet, welche die Verkehrsströme führen. Die Anzahl der Verbindungsrampen ist beliebig.

[11] MENSEBACH, S. 83

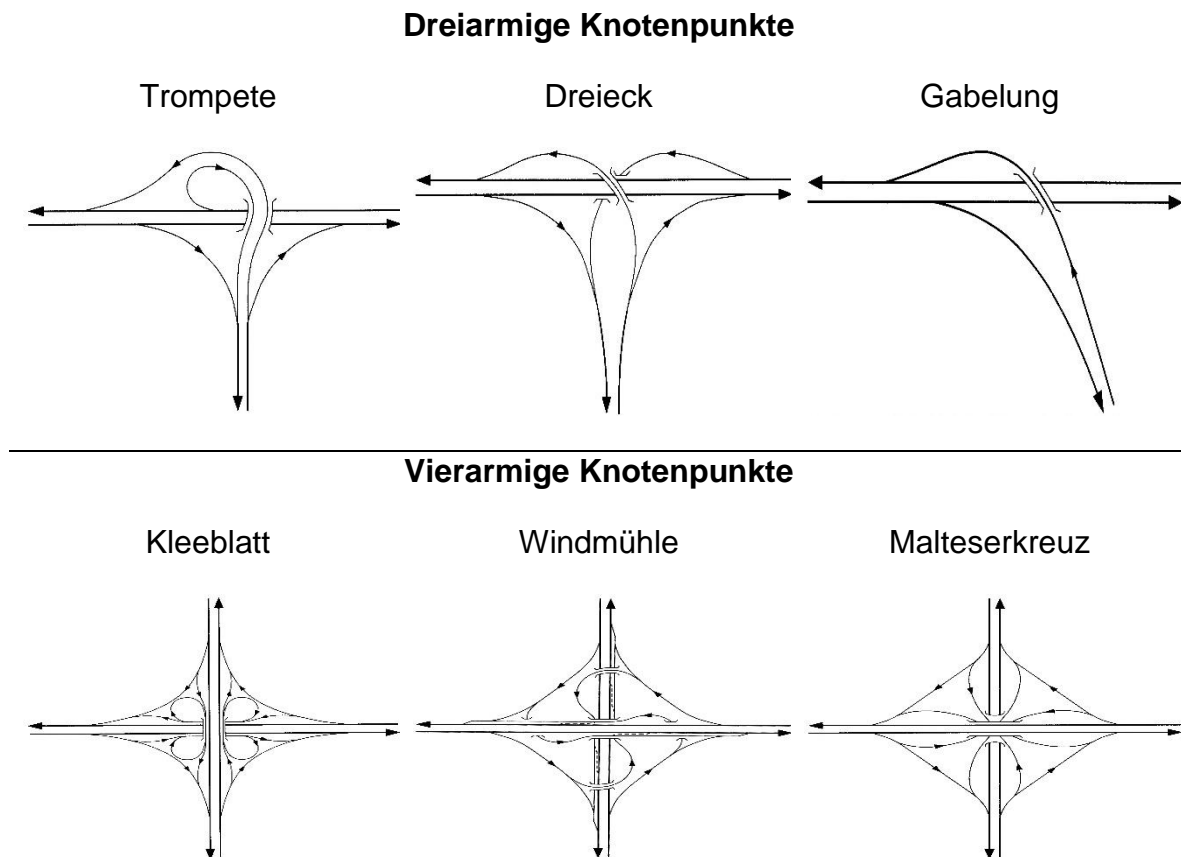


Bild 1-9: Beispiele niveaufreier Knotenpunkte (nach [12] RAA, S. 48–57)

In Bild 1-9 sind unterschiedliche niveaufreie Knotenpunkte dargestellt. Dabei wird zwischen dreiarmigen und vierarmigen Knotenpunkten unterschieden. Ein besonderes Merkmal der niveaufreien Knotenpunkte ist, dass alle Anschlussstellen der Verbindungsrampen keine kreuzenden Verkehrsströme aufweisen. In niveaufreien Knotenpunkten trennen oder vereinen sich die Verkehrsströme. [12] RAA, S. 46–57

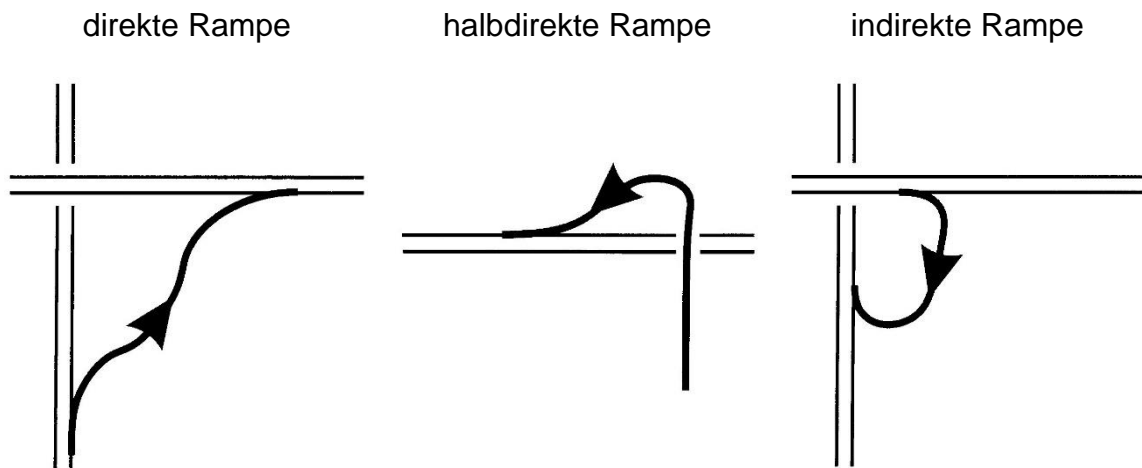


Bild 1-10: Verbindungsrampen bei niveaufreien Knotenpunkten
(nach [13] RAL, S. 63)

In Bild 1-10 sind die möglichen Varianten der Verbindungsrampen der niveaufreien Knotenpunkte detaillierter dargestellt. Verbindungsrampen werden in direkte, halbdirekte und indirekte Rampen eingeteilt. [13] RAL, S. 63

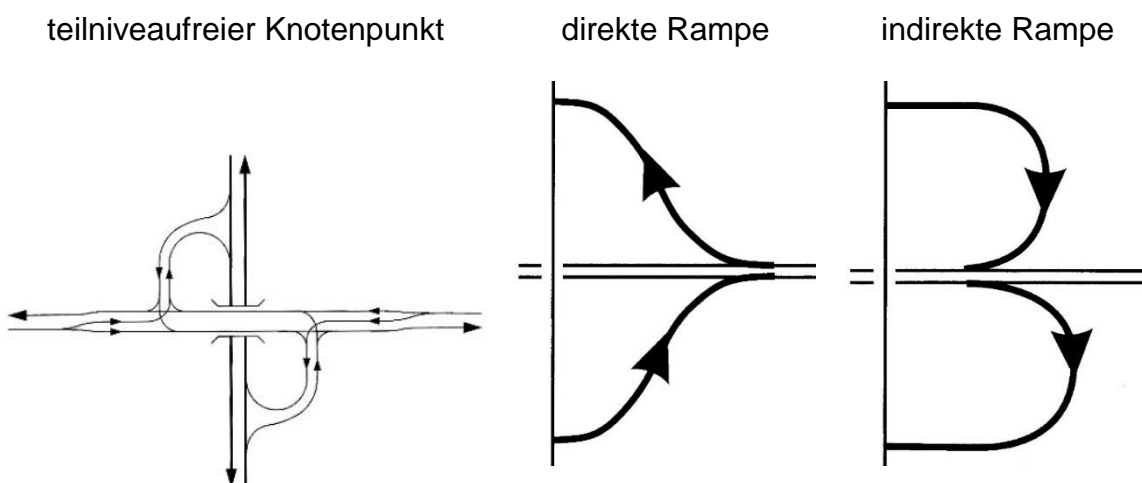


Bild 1-11: Teilniveaufreier Knotenpunkt und typische Verbindungsrampen
(nach [13] RAL, S. 57, S. 63)

Bild 1-11 zeigt einen teilniveaufreien Knotenpunkt und detailliert eine direkte und eine indirekte Verbindungsrampe. Bei teilniveaufreien Knotenpunkten ist ein Anschluss der Verbindungsrampe als niveaugleicher Teilknotenpunkt ausgeführt. Der andere Anschluss besteht aus den Aus- und Einfahrten, bei denen die Verkehrsströme aus- oder einmünden. Eine weitere typische Verbindungsrampe bei teilniveaufreien Knotenpunkten ist die halbdirekte Verbindungsrampe in Bild 1-10. [13] RAL, S. 57

1.1.3.3 Konfliktpunkte

Innerhalb von Knotenpunkten entstehen Konfliktpunkte auf Grund unterschiedlicher Verkehrsströme. Konfliktpunkte werden in drei Hauptgruppen eingeteilt. [14] BRACHER et al., S. 261

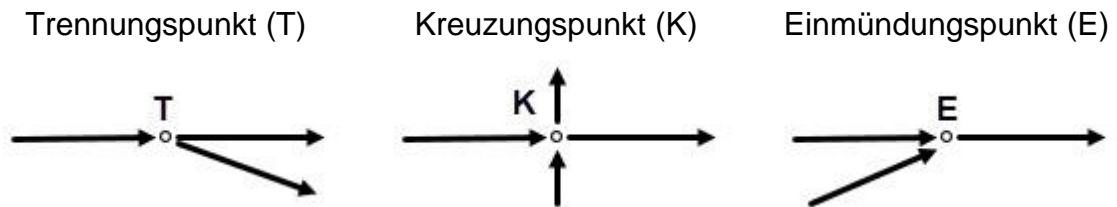


Bild 1-12: Übersicht der Konfliktpunkte (nach [14] BRACHER et al., S. 261)

Bild 1-12 zeigt die drei Hauptkategorien der Konfliktpunkte. Der jeweilige Pfeil zeigt die Verkehrsrichtung an. Der dargestellte Trennungspunkt ist der Konfliktpunkt, an welchem sich der Verkehrsstrom aufteilt. Kreuzen sich zwei Verkehrsströme, wird der Konfliktpunkt als Kreuzungspunkt bezeichnet. Der Einmündungspunkt ist der Konfliktpunkt, an dem sich zwei Verkehrsströme vereinen. [14] BRACHER et al., S. 262

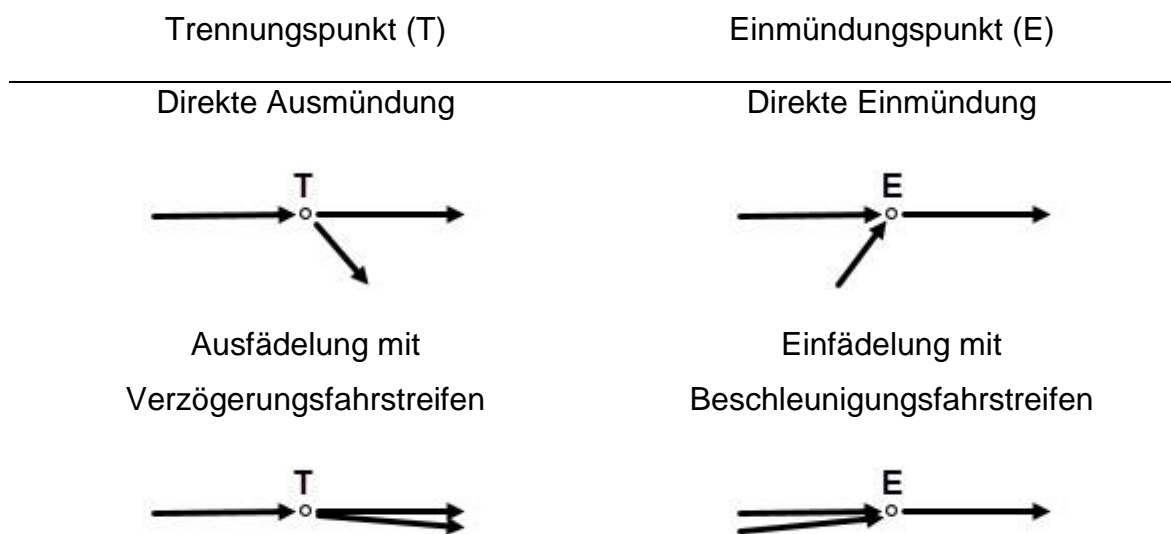


Bild 1-13: Varianten der Trennungs- und Einmündungspunkte (nach [14] BRACHER et al., S. 262)

Bild 1-13 zeigt die weitere Untergliederung von Trennungs- und Einmündungspunkten. Bei direkten Aus- und Einmündungen sind die Trennung oder Vereinigung des Verkehrsstroms unmittelbar und ohne Verzögerungs- oder Beschleunigungsfahstreifen. Bei Aus- oder Einfädelungen sind gesonderte

Verzögerungs- oder Beschleunigungsfahstreifen vorhanden. [14] BRACHER et al., S. 262

1.2 Motivation

Die durchgeführte Literaturstudie zeigt, dass deutschlandweite Daten von Verkehrsunfällen zur Analyse von Unfallursachen vorliegen. Diese beinhalten allerdings keine Informationen zum Knotenpunkttyp in unmittelbarer Nähe des Verkehrsunfalls. Die Literaturstudie zeigt ebenfalls, dass es eine Methode zur Klassifizierung gibt, welche die Infrastruktur in Bezug auf Knotenpunkttypen analysiert. Die bisherige Methode zur Klassifizierung besitzt jedoch Grenzen: Die Anwendung je Datensatz ist jeweils auf ein Bundesland beschränkt, die Erkennungsraten sind gering und es wird nur eine begrenzte Anzahl an Knotenpunkttypen betrachtet. In der Literaturanalyse zur allgemeinen Infrastruktur wurden weitere Knotenpunkttypen vorgestellt. Aus den genannten Gründen ist es notwendig, die bisherige Methode zur Klassifizierung unter der Nutzung der Erkenntnisse aus der Literaturanalyse zur Infrastruktur weiterzuentwickeln und zu verbessern.

1.3 Ziele und Aufgabenstellungen

Um die bisherige Methode zur Klassifizierung weiterzuentwickeln und zu verbessern, werden die anschließenden Ziele verfolgt. Erstes Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der bisherigen Methode zur Klassifizierung. Das zweite Ziel ist die Erweiterung der bisherigen Methode zur Klassifizierung auf die gesamte Region Deutschland. Die Anzahl der Knotenpunkttypen zu vergrößern und der Aufbau eines großen Trainings- und Testdatensatzes sind weitere Ziele. Anschließend sind die Erkennungsraten und die Korrektklassifikationsrate der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung zu verbessern. Die Anwendung der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung auf die deutschlandweite Verkehrsunfallstatistik ist ebenfalls Ziel dieser Arbeit. Abschließend ist ein Konzept zu entwickeln, um die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung anzuwenden und damit die Anzahl der Knotenpunkte in Deutschland zu ermitteln. Um diese Ziele zu erreichen, werden folgende Forschungsfragen formuliert:

1. Ist die bisherige Methode zur Klassifizierung auf das gesamte deutsche Straßennetz anwendbar?
2. Können weitere niveaugleiche Knotenpunkttypen zur Klassifizierung eingeführt werden?
3. Ist es möglich einen Trainings- und Testdatensatz mit insgesamt 10000 manuell klassifizierten Knotenpunkten aufzubauen?
4. Besteht das Problem einer Unter- oder Überanpassung des Trainings- und Testdatensatzes?
5. Wie hoch ist die Korrektklassifikationsrate des Anfangszustandes der Methode zur Klassifizierung?
6. Verbessert die Zentrierung um den nächstgelegenen identischen Punkt die bisherige Methode zur Klassifizierung?
7. Hilft eine Separierung der verbundenen Straßen die Methode zur Klassifizierung zu optimieren?
8. Können weitere Merkmale zur Klassifizierung eingeführt werden?
9. Wie hoch ist die Korrektklassifikationsrate der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung, nachdem die Knotenpunkttypen eingeführt und der Maximum-Likelihood-Klassifikator neu angelernt wurde?
10. Verbessert nur die Betrachtung der selektierten Ebenen des Referenzpunktes die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung?
11. Welche Auswirkungen haben parametrische Optimierungen auf die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung?
12. Wie hoch ist der abschließende Wert der Korrektklassifikationsrate der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung nach Einführung der Vorentscheidungen für die zweite Klassifizierungsstufe?
13. Wie sind die Häufigkeitsverteilungen der Verkehrsunfälle mit Getöteten in den Jahren 2020 bis 2022 in Bezug auf die Knotenpunkttypen?
14. Wie verhält sich die Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020?
15. Wie ist die Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Bezug auf den Straßenzustand?
16. Kann ein Konzept entwickelt werden, um die Koordinaten aller möglichen Knotenpunkte im deutschen Straßennetz zu detektieren?

2 Methode

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen auf Seite 21 erläutert.

2.1 Erweiterung der bisherigen Methode zur Klassifizierung auf die Region Deutschland

Die bisherige Methode zur Klassifizierung konnte nur für jeweils ein Bundesland pro Datensatz angewendet werden. Gleichzeitige Berechnungen für unterschiedliche Bundesländer waren nicht umsetzbar, da die Abfragezeiten bei großer Menge an eingepflegten Kartendaten in der lokalen OpenStreetMap-Datenbank zu lang waren. Es erfolgte eine interne Anpassung des Aufbaus der lokalen OpenStreetMap-Datenbank im Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, damit wurden die Abfragezeiten bei Verwendung großer Datenmengen deutlich reduziert. Dies ermöglichte die Erweiterung der lokalen OpenStreetMap-Datenbank mit den Kartendaten ganz Deutschlands. Für die lokale OpenStreetMap-Datenbank werden aktuelle frei verfügbare Geodaten von Geofabrik verwendet [15] GEOFABRIK. Geofabrik stellt Geodaten in unterschiedlichen Formaten zur Verfügung und bezieht seinerseits seine Kartendaten aus dem OpenStreetMap-Projekt. Unter dem Downloadbereich der Geofabrik-Homepage wird auf den Geofabrik-Downloadserver verwiesen. Auf diesem sind die Kartendaten von Deutschland unter der Rubrik Europa hinterlegt [16] GEOFABRIK DOWNLOADSERVER. Die Datei „germany-latest.osm.pbf“ wird heruntergeladen und anschließend in die lokale OpenStreetMap-Datenbank eingespielt. Visuell sind die geometrischen Kartendaten von OpenStreetMap in Anhang 2 auf Seite A2 „blau“ dargestellt. Die Kartendaten beinhalten geometrische Linien, kleine Kreise und Formen. Die Linien sind u.a. Straßen, Fuß- und Radwege, Treppen, Hochspannungsleitungen, Gräben und Flüsse. Die kleinen Kreise sind die „Points of Interest“. Diese zeigen u.a. Ampeln, Bäume, Briefkästen, Bushaltestellen, Denkmäler, Hydranten, Tore, Verkehrsschilder und Zebrastreifen an. Die Formen entsprechen z.B. Gebäuden, Gewässern, Parks, Wäldern, Feldern und Naturschutzgebieten. [17] OPENSTREETMAP GEODATEN

2.2 Einführung weiterer Knotenpunkttypen

Grundlegend bestehen zweibahnige Straßen aus jeweils einer Richtungs- und einer Gegenfahrbahn. Die einbahnige Straße ist in der Regel eine Gegenverkehrsstraße. In Anlehnung an Bild 1-8 auf Seite 16 und Bild 1-13 auf Seite 19 werden weitere Knotenpunkttypen bzw. Klassen definiert. Durch die Grundform II als Einmündung und als Kreuzung werden die mittlere Einmündung und die mittlere 4-Straßen-Kreuzung eingeführt. Bezugnehmend auf die Grundform III als Einmündung wird die große Einmündung als Knotenpunkttyp definiert. Eine weitere Klasse, als Fädelungspunkt bezeichnet, ergibt sich infolge des Trennungs- und Einmündungspunktes. Aus der Analyse der OpenStreetMap-Straßen-Geometrien heraus entstand noch eine weitere neue Klasse: Wenn sich zweibahnige Straßen zu einbahnigen Straßen vereinen, wird die Fahrbahntrennung als zusätzliche Klasse definiert. Die Fahrbahntrennung ist jedoch kein Knotenpunkt im Sinne der Literatur zur Infrastruktur, sondern eine bauliche Maßnahme der Infrastruktur.

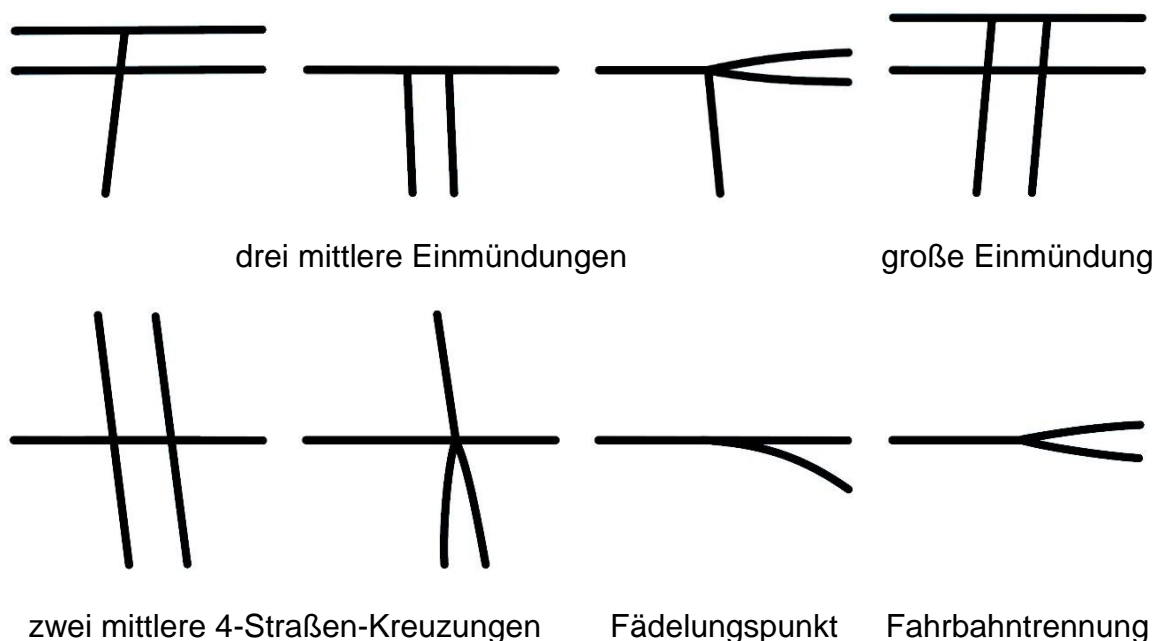


Bild 2-1: Übersicht neu eingeführter Knotenpunkte

Bild 2-1 zeigt die eingeführten Knotenpunkttypen. Weitere Knotenpunkttypen sind im Anhang 3 auf Seite A3 dargestellt. Im Folgenden werden die eingeführten Knotenpunkttypen erläutert.

2.2.1 Mittlere Einmündung

Eine Einmündung wird dadurch charakterisiert, dass eine einbahnige Straße in eine andere einbahnige Straße einmündet. Bei der mittleren Einmündung ist entweder die übergeordnete Straße zweibahnig und die einmündende Straße einbahnig oder die übergeordnete Straße ist einbahnig und die einmündende Straße zweibahnig. Eine weitere Variante ist, dass nur ein beliebiger Straßenarm im Ursprung als zweibahnige Straße beginnt. Der Winkel der einmündenden Straße ist beliebig. Die mittlere Einmündung wird auch als „TM“ definiert.

2.2.2 Große Einmündung

Bei der großen Einmündung mündet eine zweibahnige Straße in eine andere zweibahnige Straße. Die Anzahlen der Straßenarme am jeweiligen Konfliktpunkt des Knotenpunktes sind zweimal drei und zweimal vier wegführende Straßenarme. Alle Straßenarme sind Richtungsfahrbahnen. Der Winkel der einmündenden Straße ist beliebig. Die große Einmündung wird auch als „TL“ definiert.

2.2.3 Mittlere 4-Straßen-Kreuzung

Bei der mittleren 4-Straßen-Kreuzung kreuzt sich eine einbahnige Straße mit einer zweibahnigen Straße. An jedem Konfliktpunkt des Knotenpunktes kreuzt sich eine Gegenverkehrsstraße mit einer Richtungsfahrbahn. Eine weitere Variante ist, dass ein beliebiger Straßenarm im Ursprung als zweibahnige Straße beginnt. Der Winkel zwischen den sich kreuzenden Straßen ist beliebig. Die mittlere 4-Straßen-Kreuzung wird auch als „XM“ definiert.

2.2.4 Fädelpunkt

Ausfädelungs- und Einfädelpunkte werden als Fädelpunkt zusammengefasst und als „V“ definiert. Der Fädelpunkt ist ein Konfliktpunkt und Teil eines Knotenpunktes. Dieser hat in der Regel drei wegführende Straßenarme. Entweder sind die drei Straßenarme als drei Richtungsfahrbahnen ausgeführt oder nur die ausfädelnde oder einfädelnde Fahrbahn ist eine Richtungsfahrbahn. Sonderfall ist der zweifache Fädelpunkt, wie in Anhang 3 auf Seite A3 dargestellt. Bei diesem Konfliktpunkt sind es vier wegführende

Straßenarme, zwei davon sind Richtungsfahrbahnen. Der Winkel zwischen Gegenverkehrsstraße und fädelnder Fahrbahn ist klein.

2.2.5 Fahrbahntrennung

Die Fahrbahntrennung wird als „Y“ definiert. Bei der Fahrbahntrennung vereint sich eine zweibahnige Straße zu einer einbahnigen Straße. Am Referenzpunkt hat die Fahrbahntrennung drei wegführende Straßen. Ein Straßenarm ist eine Gegenverkehrsstraße, die anderen beiden Straßenarme sind Richtungsfahrbahnen. Der Winkel zwischen den Richtungsfahrbahnen ist klein.

2.3 Vergrößerung des Trainings- und Testdatensatz auf 10000 manuell klassifizierte Knotenpunkte

Um ausreichend Werte für die Trainings- und Testdaten zu erhalten, wird der gesamte Datensatz mit Hilfe eines Programms auf 10000 manuell klassifizierte Knotenpunkte aufgebaut. Die Ausgangsdaten stammen von Destatis [18] DESTATIS. Es wurde der Datensatz des Jahres 2021 verwendet. Zu Beginn wurde das Programm an die neu eingeführten Knotenpunkttypen aus Kapitel 2.2 ab Seite 23 angepasst und durch eine OpenStreetMap-Karte der Kartenebene „Standard“ erweitert. Die Bedienmaske des Programms ist in Anhang 4 auf Seite A4 abgebildet und zeigt einen zu klassifizierenden Knotenpunkt. Auf der linken Seite ist die Dokumentation der zweiten Klassifizierungsstufe, wie in Kapitel 1.1.2.1 ab Seite 5 beschrieben, dargestellt. Auf der rechten Seite ist die OpenStreetMap-Karte abgebildet. Die Klassifizierung des Knotenpunktes erfolgt über die untere Leiste. Die importierte OpenStreetMap-Karte dient als Übersicht der Umgebung. Da die abgebildeten Straßen mit Pfeilen gekennzeichnet sind, können Verkehrsrichtungen berücksichtigt werden.

Im ersten Schritt wird eine große Datenmenge von Destatis mit der bisherigen Methode zur Klassifizierung berechnet. Danach werden die klassifizierten Knotenpunkte einzeln in das Programm eingelesen, analysiert und manuell neu klassifiziert bis die Anzahl von 10000 klassifizierten Knotenpunkten erreicht ist. Anschließend wird die gesamte Datenmenge mit einem Verhältnis von 70 zu 30 in 7000 Trainings- und 3000 Testdaten aufgeteilt, wie in der Literatur empfohlen [19]

MUELLER et al., S. 200. Die Trainingsdaten werden für Analysen verwendet und um den Maximum-Likelihood-Klassifikator anzulernen. Mit dem Testdatensatz werden Kennzahlen der Methode zur Klassifizierung ermittelt. Damit können verschiedene Entwicklungsstände der Methode zur Klassifizierung verglichen werden. Um zwei ausgewogene Datenmengen zu erhalten, wird die Anzahl und Verteilung der Knotenpunkttypen in jedem der Datensätze überprüft. Bei unausgeglichenen Trainings- und Testdaten besteht die Gefahr einer schlechten Anpassung der Methode zur Klassifizierung, auch Unteranpassung genannt. Das Problem einer übermäßigen Anpassung durch eine spezielle Sortierung, auch Überanpassung genannt, besteht nicht, da die Datenmengen keiner Sortierung obliegen. [19] MUELLER et al., S. 200–201

2.4 Anfangszustand der bisherigen Methode zur Klassifizierung

Um Ausgangswerte zu erhalten wird die bisherige Methode zur Klassifizierung mit den neuen Testdaten angewendet. Dabei muss der neu erstellte Testdatensatz aus Kapitel 2.3 auf Seite 25 auf die Klassen der bisherigen Methode zur Klassifizierung angepasst werden. Dazu wird der Testdatensatz in die zu Beginn vorhandenen fünf Klassen unterteilt. Diese Klassen sind folgende: Einmündung, 4-Straßen-Kreuzung, große 4-Straßen-Kreuzung, komplexe Kreuzung und „kein Knotenpunkt“. Der Testdatensatz umfasst demzufolge anstatt 3000 nur 2500 manuell klassifizierte Knotenpunkte, die nachfolgend als Referenzdaten bezeichnet werden. Für die gemeinsame Darstellung der „klassifizierten Daten“ und der „Referenzdaten“ wird eine Konfusionsmatrix verwendet. Die Spalten entsprechen den Referenzdaten, anschließend als „Soll“ bezeichnet, und die Zeilen den klassifizierten Daten, künftig als „Ist“ benannt. [20] BRUCE et al., S. 228–230

Tabelle 2-1: Konfusionsmatrix (98 Trainingsdaten, 42 Testdaten)

Soll \ Ist	Knotenpunkttyp A	Knotenpunkttyp B	Knotenpunkttyp C	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
Knotenpunkttyp A	10	2	3	15
Knotenpunkttyp B	1	10	3	14
Knotenpunkttyp C	1	2	10	13
Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)	12	14	16	42

Tabelle 2-1 zeigt eine Konfusionsmatrix mit beliebigen Werten. Die **Testdaten** umfassen 42 Knotenpunkte aus drei Knotenpunkttypen. Ausgehend von dem Knotenpunkttyp A werden die Werte in der Konfusionsmatrix erläutert. Der grüne Wert entspricht „**richtig-positiv**“ und bedeutet, dass zehn Knotenpunkte korrekt als Knotenpunkttyp A klassifiziert wurden. Die roten Werte sind als „**falsch-positiv**“ bestimmt und sagen aus, dass zwei Knotenpunkte vom Knotenpunkttyp B und drei Knotenpunkte vom Knotenpunkttyp C irrtümlich als Knotenpunkttyp A klassifiziert wurden. Die orangenen Werte sind als „**falsch-negativ**“ definiert und bedeuten, dass zwei Knotenpunkte vom Knotenpunkttyp A als ein Knotenpunkttyp B und ein Knotenpunkttyp C klassifiziert wurden. Die blauen Werte, auch als „**richtig-negativ**“ bezeichnet, drücken aus, dass 25 Knotenpunkte exakt als andere Knotenpunkttypen klassifiziert wurden. Diese Erklärung gilt für jeden beliebigen Knotenpunkttyp. Der Unterschied ist, dass die Eigenschaften entsprechend angepasst werden müssen. Anhand der Konfusionsmatrix werden einige Kennzahlen, die im Anschluss eingeführt werden, erstellt. Die erste Kennzahl ist die „richtig-positiv-Rate“:

$$\text{Richtig-positiv-Rate} = \frac{\text{richtig-positiv}}{\text{richtig-positiv} + \Sigma \text{falsch-negativ}} \quad (1)$$

Die zweite Kennzahl ist der positive Vorhersagewert:

$$\text{positiver Vorhersagewert} = \frac{\text{richtig-positiv}}{\text{richtig-positiv} + \Sigma \text{falsch-positiv}} \quad (2)$$

Die dritte Kennzahl ist der negative Vorhersagewert:

$$\text{negativer Vorhersagewert} = \frac{\Sigma \text{richtig-negativ}}{\Sigma \text{richtig-negativ} + \Sigma \text{falsch-negativ}} \quad (3)$$

Nachfolgend werden Knotenpunkttypen als „KPT“ definiert. Eine weitere Kennzahl ist die positive Erkennungsrate der gesamten Methode zur Klassifizierung:

$$\text{positive Erkennungsrate} = \frac{\Sigma_{\text{KPT}} \text{richtig-positiv}}{\text{Testdaten}} \quad (4)$$

Die negative Erkennungsrate der gesamten Methode zur Klassifizierung wird definiert durch:

$$\begin{aligned} \text{negative Erkennungsrate} \\ = \frac{\Sigma_{\text{KPT}} \Sigma \text{richtig-negativ}}{\Sigma_{\text{KPT}} (\Sigma \text{richtig-negativ} + \Sigma \text{falsch-negativ})} \end{aligned} \quad (5)$$

Die Korrektklassifikationsrate der gesamten Methode zur Klassifizierung wird bestimmt durch:

$$\text{Korrektklassifikationsrate} = \frac{\Sigma_{\text{KPT}} (\text{richtig-positiv} + \Sigma \text{richtig-negativ})}{\Sigma_{\text{KPT}} \text{Testdaten}} \quad (6)$$

Mit Hilfe der Kennzahlen wird der aktuelle Stand der Methode zur Klassifizierung bewertet und unterschiedliche Versionen werden miteinander verglichen. [20] BRUCE et al., S. 227–232

Tabelle 2-2: Kennzahlen (98 Trainingsdaten, 42 Testdaten)

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
Knotenpunkttyp A	83,3	66,7	92,6
Knotenpunkttyp B	71,4	71,4	85,7
Knotenpunkttyp C	62,5	76,9	79,3

positive Erkennungsrate = 71,4 % (Anfangszustand)

negative Erkennungsrate = 85,7 % (Anfangszustand)

Korrektklassifikationsrate = 81,0 % (Anfangszustand)

Die Tabelle 2-2 stellt beispielhaft die Kennzahlen dar, die aus den Werten der Tabelle 2-1 von Seite 27 berechnet wurden. Die Knotenpunkte vom Knotenpunkttyp A der Beispiel-Referenzdaten wurden zu 83,3 Prozent als Knotenpunkttyp A klassifiziert. Ein klassifizierter Knotenpunkt vom Knotenpunkttyp C ist zu 76,9 Prozent ein Knotenpunkttyp C der Beispiel-Referenzdaten. Die klassifizierten Knotenpunkte von den Knotenpunkttypen B und C sind zu 92,6% kein Knotenpunkttyp A der Beispiel-Referenzdaten. Die positive Erkennungsrate der Beispiel-Referenzdaten beträgt 71,4 Prozent und die negative Erkennungsrate 85,7 Prozent. Die Korrektklassifikationsrate des Beispiels ist 81,0 Prozent.

2.5 Zentrierung des Unfallortes um den Referenzpunkt

Nach der ersten Klassifizierungsstufe wird für einen unbekanntem Knotenpunkt ein Referenzpunkt definiert. Dieser ist der nächstgelegene mehrfach überlagerte Punkt ausgehend von der Ursprungskordinate und innerhalb des quadratischen Suchfeldes mit 50 Metern Kantenlänge. Der Referenzpunkt ist von nun an der Mittelpunkt für die zweite Klassifizierungsstufe.

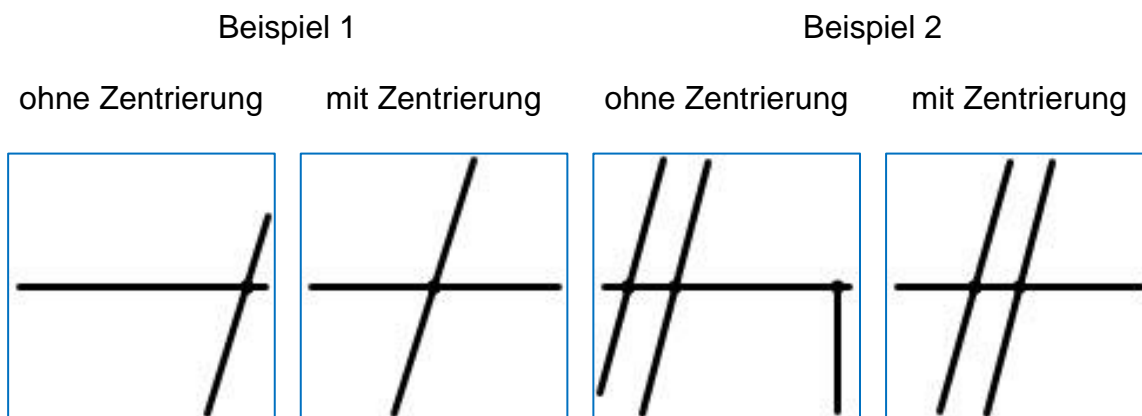


Bild 2-2: Beispiele der Optimierung „Zentrierung“

Bild 2-2 stellt zwei Beispiele der Zentrierung dar. Das erste Beispiel präsentiert bei „ohne Zentrierung“ fehlende Straßen-Geometrie des zu klassifizierenden Knotenpunktes. Mit der Zentrierung ist die relevante Straßen-Geometrie vorhanden. Das zweite Beispiel zeigt, dass nach der Zentrierung eine Straßen-Geometrie, die nicht zum zu klassifizierenden Knotenpunkt gehört, verschwindet. Die Zentrierung bringt den Knotenpunkt für die Methode zur Klassifizierung in eine standardisierte Position, äquivalent der horizontalen Ausrichtung der Straßen-Geometrien, wie in Kapitel 1.1.2.1 auf Seite 4 beschrieben.

2.6 Separierung der verbundenen Fahrbahnen

Die Optimierung „verbundene Fahrbahn“ wird bereits ab der ersten Klassifizierungsstufe angewendet. Ausgehend von der zu untersuchenden Koordinate wird die nächstliegende importierte Straßen-Geometrie referenziert. Alle Straßen-Geometrien, die eine Verbindung mit der referenzierten Straßen-Geometrie besitzen, werden verknüpft und ein Verbund entsteht. Eine Verbindung zweier Straßen-Geometrien bedeutet, dass diese mindesten einen gemeinsamen geometrischen Punkt aufweisen müssen. Anschließend werden weitere Verbindungen des neuen Verbundes gesucht. Sind diese vorhanden, entsteht ein größerer Verbund. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis alle möglichen Verbindungen gefunden sind. Zuletzt werden alle Straßen-Geometrien, die keine Verbindung besitzen, gelöscht.

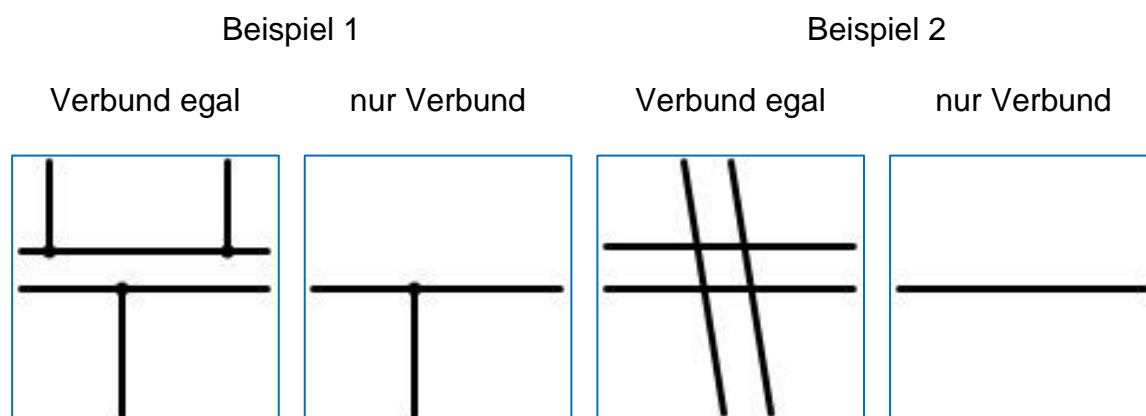


Bild 2-3: Beispiele der Optimierung „Verbund“

Bild 2-3 zeigt zwei Beispiele der Optimierung „Verbund“ nach der ersten Klassifizierungsstufe. Im ersten Beispiel wird der obere Teil der zweibahnigen Straße und deren Einmündungen entfernt. Im zweiten Beispiel führt eine zweibahnige Straße über eine andere zweibahnige Straße. Die baulich getrennte Gegenfahrbahn der zweibahnigen Straße und die überführende zweibahnige Straße werden entfernt. Die Einführung der Optimierung „Verbund“ hat zur Folge, dass in Bezug auf das Merkmal n_{roads} das Kapitel 1.1.2.3 ab Seite 7 und das Kapitel 1.1.2.4 auf Seite 11 angepasst werden. Im Folgenden werden die Änderungen dargestellt.

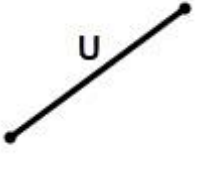

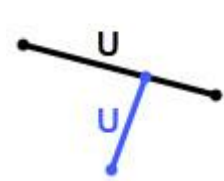
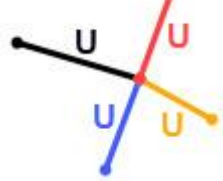
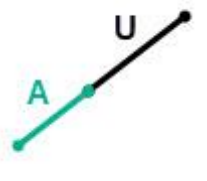

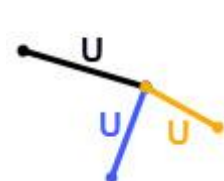
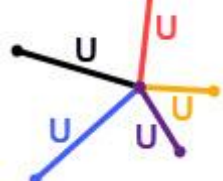
	I	II	III	IV
1	 <p>Gerade, einzeln $n_{roads} = 1$</p>	 <p>Kurve, einzeln $n_{roads} = 1$</p>	 <p>Knotenpunkt 1 $n_{roads} = 2$</p>	 <p>Knotenpunkt 2 $n_{roads} = 4$</p>
2	 <p>abhängige Gerade $n_{roads} = 1$</p>	 <p>abhängige Kurve $n_{roads} = 1$</p>	 <p>Knotenpunkt 3 $n_{roads} = 3$</p>	 <p>Knotenpunkt 4 $n_{roads} = 5$</p>

Bild 2-4: Verschiedene Straßen-Geometrien zur überarbeiteten Erklärung des Merkmals „unabhängige Straßen-Geometrie“

Bild 2-4 zeigt die überarbeitete Erläuterung des Merkmals n_{roads} und aktualisiert das Bild 1-5 auf Seite 8. Die Methode zur Klassifizierung muss im Folgenden weniger Daten verarbeiten und unrelevante Straßen-Geometrien haben keinen Einfluss auf die Berechnungen.

Tabelle 2-3: Angepasste Schwellenwerte zur Klassifizierung von Gerade, Kurve und unbekanntem Knotenpunkt unter Einbeziehung der Anzahl des Merkmals „unabhängige Straßen-Geometrie“

Merkmal n_{roads} Anzahl unabhängiger Straßen-Geometrien	1	>1
Straßen-Geometrie	Gerade, Kurve	unbekannter Knotenpunkt

Die Tabelle 2-3 zeigt durch die Optimierung „Verbund“ die aktualisierten Schwellenwerte für das Merkmal n_{roads} und ersetzt die Tabelle 1-2 auf Seite 9. Es gibt nur noch einen Schwellenwert.

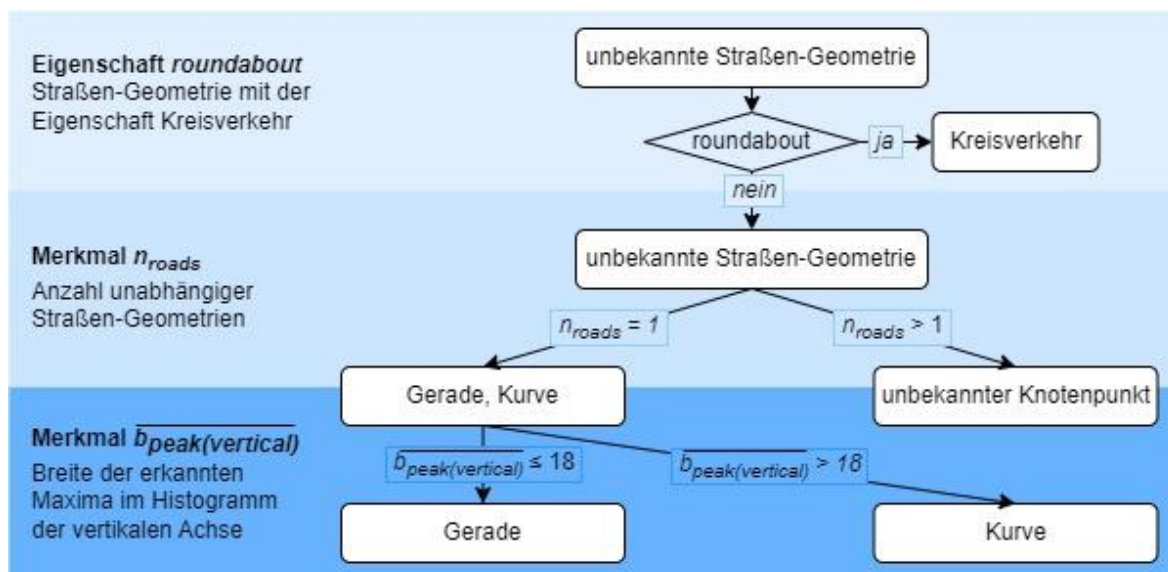


Bild 2-5: Angepasste erste Klassifizierungsstufe

Bild 2-5 zeigt die aktualisierte erste Klassifizierungsstufe und ersetzt das Bild 1-6 auf Seite 11. Die Vorentscheidung mit dem Merkmal $n_{peak(horizontal)}$ wurde obsolet.

2.7 Einführung weiterer Merkmale

Unter diesem Gliederungspunkt werden weitere Merkmale eingeführt, die zur Verbesserung der Klassifizierung beitragen sollen. Die Merkmale werden in der zweiten Klassifizierungsstufe verwendet, um Vorentscheidungen zu treffen und um den Maximum-Likelihood-Klassifikator anzulernen.

2.7.1 Häufigkeit überlagerter Punkte

Die Merkmale n_2 -identical-point, n_3 -identical-point, n_4 -identical-point, n_5 -identical-point und n_6 -identical-point entsprechen der Häufigkeit der überlagerten Punkte. Die Zahl im Index steht für die Anzahl identischer Punkte. Merkmal n_2 -identical-point definiert die Menge der zweifach überlagerten Punkte. Die anderen Merkmale werden äquivalent dazu bestimmt. Jede Straßen-Geometrie besitzt einen Anfangs- und Endpunkt, sie besteht aus beliebig vielen einzelnen Zwischenpunkten. Je komplexer eine Straßen-Geometrie ist, umso mehr Punkte beinhaltet sie. Treffen Straßen-Geometrien zusammen, sind Punkte mehrfach vorhanden. Im Trainingsdatensatz der 7000 Knotenpunkte befindet sich lediglich ein einzelner siebenfach überlagerter Punkt. Daher werden diese Merkmale zu sechsfach überlagerten Punkten eingeführt.

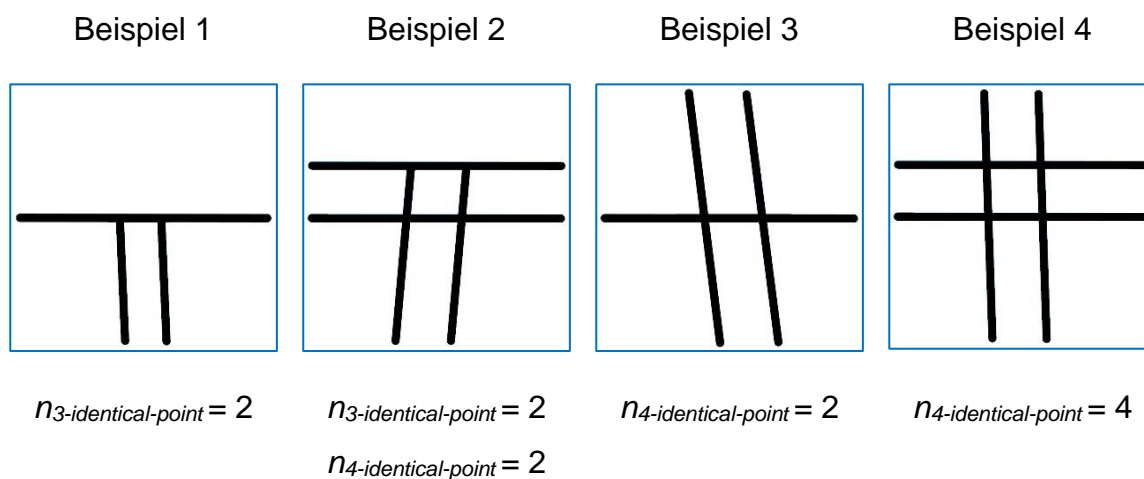


Bild 2-6: Merkmal „Anzahl der überlagerten Punkte“

Bild 2-6 zeigt vier Beispiele und die zugehörigen Anzahlen der überlagerten Punkte.

2.7.2 Anzahl der Straßenarme am Referenzpunkt

Merkmal n_{arms} beschreibt die Anzahl der Straßenarme am Referenzpunkt. Die Methode zur Klassifizierung berechnet jeden einzelnen Winkel zwischen den nebeneinanderliegenden Straßenarmen im Uhrzeigersinn. Die Anzahl der Winkel entspricht der Anzahl der Straßenarme.

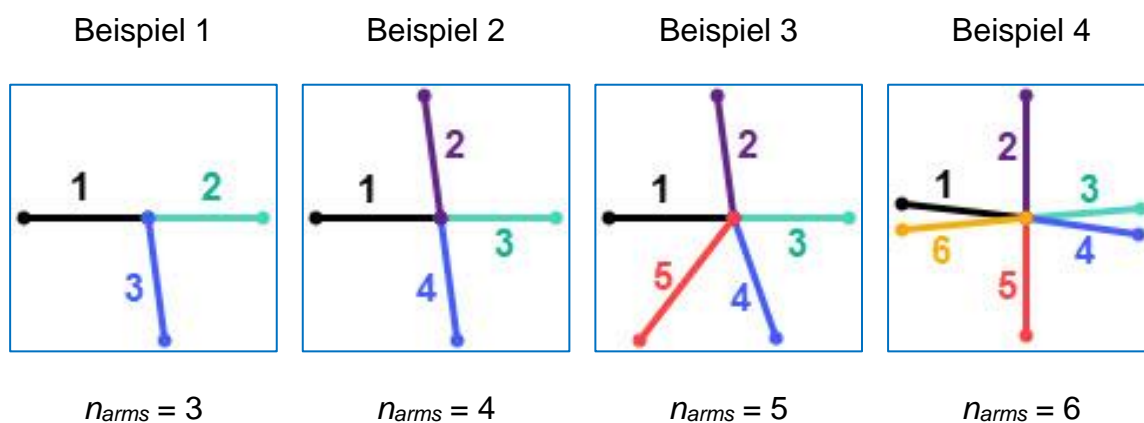


Bild 2-7: Merkmal „Anzahl der Straßenarme“

Bild 2-7 zeigt vier Beispiele mit der zugehörigen Anzahl der Straßenarme. Zur besseren Veranschaulichung hat jeder Straßenarm eine andere Farbe.

2.7.3 Größter und kleinster Winkel zwischen benachbarten Straßenarmen am Referenzpunkt

Die Merkmale $angle_{max}$ und $angle_{min}$ entsprechen dem größten und dem kleinsten Winkel zwischen benachbarten Straßenarmen. Die Methode zur Klassifizierung dokumentiert jeden einzelnen Winkel. Mit einer Funktion für maximale und minimale Werte werden die Werte ausgelesen und definiert.

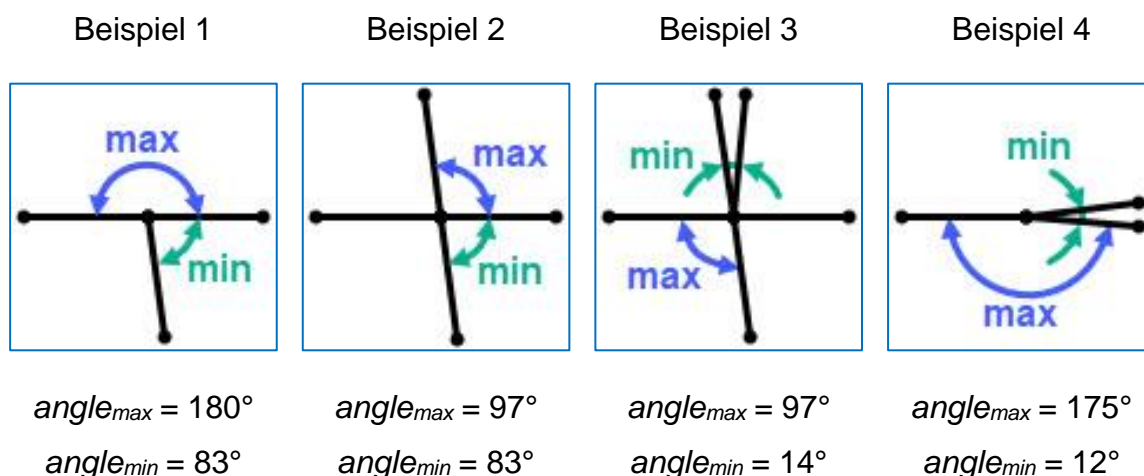


Bild 2-8: Merkmal „größter und kleinster Winkel“

Bild 2-8 zeigt vier Beispiele der größten und kleinsten Winkel zwischen nebeneinanderliegenden Straßenarmen.

2.7.4 Anzahl der Gegenverkehrsstraßen und Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt

Das Merkmal $n_{two-way}$ beschreibt die Anzahl der Gegenverkehrsstraßen am Referenzpunkt, das Merkmal $n_{one-way}$ die Anzahl der Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt. Jede Straßen-Geometrie aus den OpenStreetMap-Daten kann die Eigenschaft „oneway“ besitzen. Ist der zugehörige Wert mit „yes“ ausgewiesen, handelt es sich um eine Richtungsfahrbahn. In allen anderen Fällen wird die Straßen-Geometrie als Gegenverkehrsstraße definiert. Die Methode zur Klassifizierung zählt die Anzahl der Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt. Die Differenz zwischen der Anzahl der Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt und der gesamten Anzahl der Straßenarme bildet die Anzahl der Gegenverkehrsstraßen am Referenzpunkt.

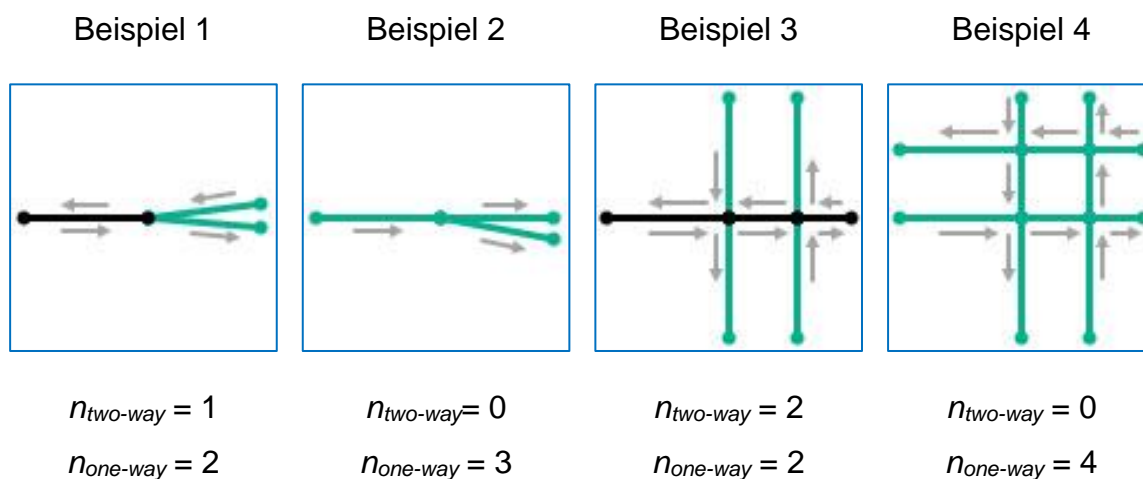


Bild 2-9: Merkmal „Anzahl der Gegenverkehrsstraßen und Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt“

Bild 2-9 stellt vier Beispiele zur Anzahl der Gegenverkehrsstraßen und Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt dar. Die Gegenverkehrsstraßen sind in schwarz und die Richtungsfahrbahnen in grün abgebildet. Die Pfeile zeigen die Verkehrsrichtung an.

2.7.5 Schnittpunkte mit dem Quadrat im Rasterbild

Das Merkmal $n_{cut-x-square-all}$ beschreibt die Anzahl aller Schnittpunkte zwischen den Straßen-Geometrien und einem imaginären horizontal ausgerichtetem Quadrat im Rasterbild. Der Mittelpunkt des Quadrates entspricht dem Referenzpunkt. Das „x“ im Index steht einmal für „50“ oder für „max“. Mit dem Index „50“ bedeutet es, dass das Quadrat eine Kantenlänge von 50 Metern besitzt. Mit dem Index „max“ ist die Kantenlänge in Abhängigkeit der Straßenklasse, wie in Kapitel 1.1.2.6 auf Seite 13 beschrieben, definiert. Diese Indexierung trifft für alle folgenden Merkmale zu. Das Merkmal $n_{cut-x-square-left}$ entspricht der Anzahl aller Schnittpunkte der Straßen-Geometrien mit der linken Seite des Quadrates, das Merkmal $n_{cut-x-square-right}$ mit der rechten Seite des Quadrates, das Merkmal $n_{cut-max-square-top}$ mit der oberen Seite des Quadrates und das Merkmal $n_{cut-x-square-bottom}$ mit der unteren Seite des Quadrates. Überlagerte oder aneinanderliegende Straßen-Geometrien zählen einfach. Schneiden sich Straßen-Geometrien mit dem Quadrat genau in einer Ecke, dann addiert sich der Wert um eins derjenigen Seite des Quadrates, welche mehr überlagert wurde. Das Merkmal $cut_{all-site-x-square}$ bildet einen logischen Wert und kann entweder für wahr den Wert „1“ oder für falsch den Wert „0“ annehmen. Es wird eine

Aussage darüber getroffen, ob alle Seiten des Quadrates mindestens einen Schnittpunkt aufweisen.

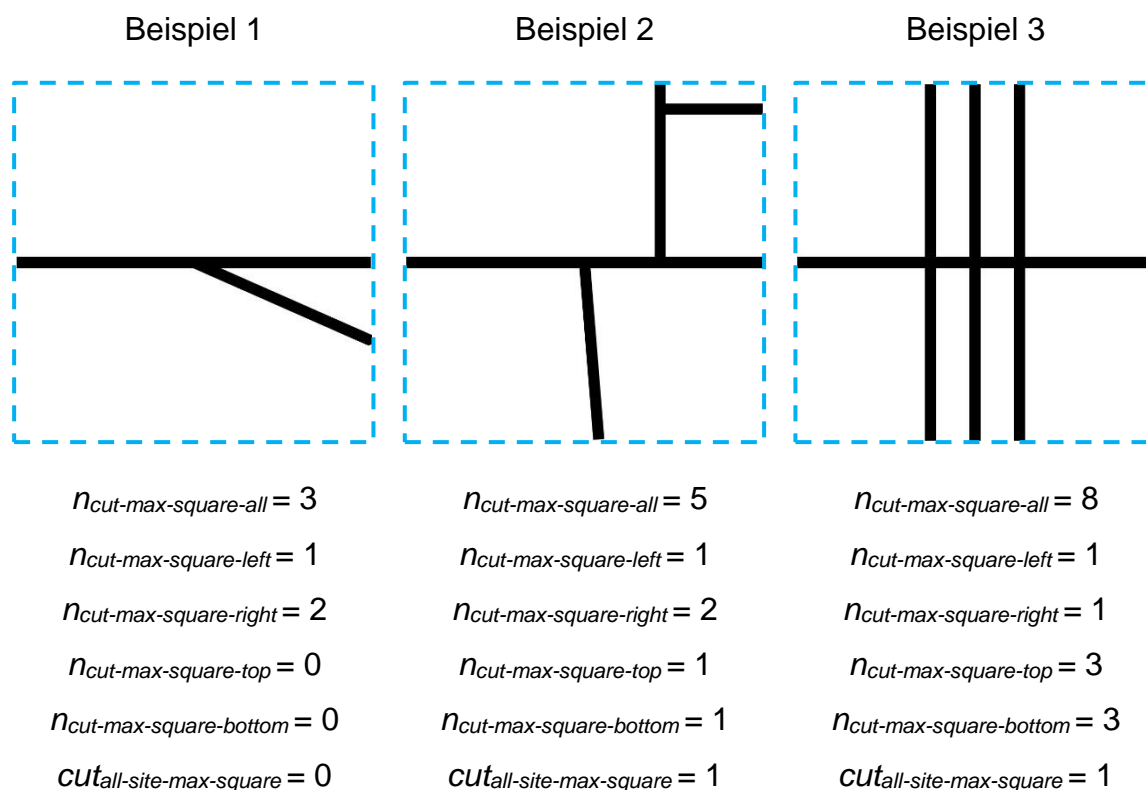


Bild 2-10: Merkmal „Schnittpunkte mit dem Quadrat im Rasterbild“

Bild 2-10 zeigt drei Beispiele aller Merkmale mit den Schnittpunkten der Straßen-Geometrien und dem blau gestrichelten Quadrat mit maximaler Kantenlänge. Auf die Darstellung der Merkmale mit den Schnittpunkten der Straßen-Geometrien und dem Quadrat mit 50 Metern Kantenlänge wird verzichtet, da diese Werte äquivalent gebildet werden.

2.7.6 Schnittpunkte mit dem Kreis im Rasterbild

Das Merkmal $n_{cut-x-circle-all}$ entspricht der Anzahl aller Schnittpunkte zwischen den Straßen-Geometrien und einem imaginären Kreis im Rasterbild. Der Mittelpunkt des Kreises liegt im Referenzpunkt. Das „x“ im Index kann den Wert [50; 40; 30; 20; 12,5] oder „max“ annehmen. Die Zahl im Index entspricht dem Durchmesser des Kreises in Metern. Der Index „max“ beschreibt den Durchmesser in Abhängigkeit der Straßenklasse, wie in Kapitel 1.1.2.6 auf Seite 13 dargestellt. Die erläuterte Indexierung gilt für alle folgenden Merkmale. Der oberste Punkt des Kreises wird als Nullpunkt des Kreiswinkels definiert. Die Drehrichtung des Winkels ist im

Uhrzeigersinn. Das Merkmal $n_{cut-x-circle-left}$ entspricht der Anzahl aller Schnittpunkte der Straßen-Geometrien mit dem linken Kreisbogen von 225 bis 315 Grad, das Merkmal $n_{cut-x-circle-right}$ dem rechten Kreisbogen von 45 bis 135 Grad, das Merkmal $n_{cut-max-circle-top}$ dem oberen Kreisbogen von 315 bis 45 Grad und das Merkmal $n_{cut-x-circle-bottom}$ dem unteren Kreisbogen von 135 bis 225 Grad. Aufeinanderliegende oder sich berührende Straßen-Geometrien zählen einfach. Werden Straßen-Geometrien zwischen zwei 90-Grad-Kreisbögen geschnitten, dann wird der Wert mit dem 90-Grad-Kreisbogen um eins hinzugerechnet, dessen Kreisbogen mehr überlagert wurde. Das Merkmal $cut_{all-site-x-circle}$ gleicht einem logischen Wert und kann entweder für wahr den Wert „1“ oder für falsch den Wert „0“ besitzen. Diesbezüglich wird eine Aussage getroffen, ob alle 90-Grad-Kreisbögen mehr als einen Schnittpunkt enthalten.

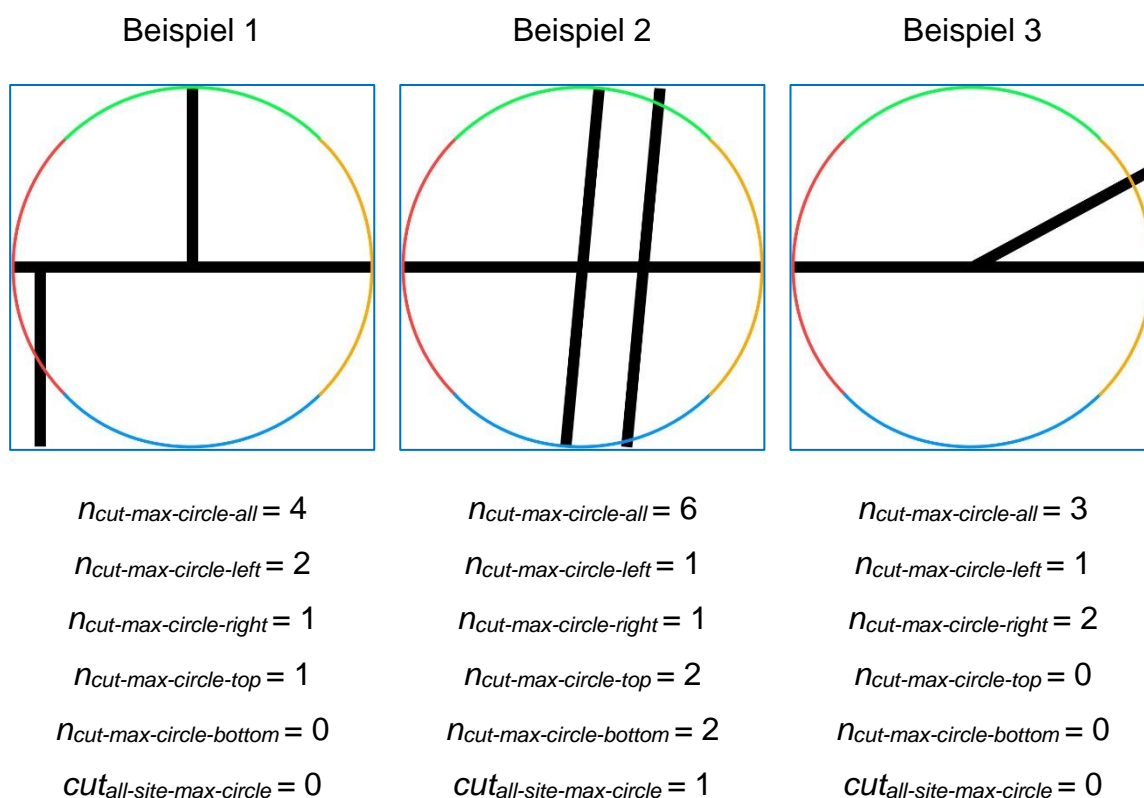


Bild 2-11: Merkmal „Schnittpunkte mit dem Kreis im Rasterbild“

Bild 2-11 präsentiert drei Beispiele aller Merkmale mit den Schnittpunkten der Straßen-Geometrien und dem farbigen Kreis mit maximalem Durchmesser. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen die Bereiche der 90-Grad-Kreisbögen. Von der Darstellung der Merkmale mit den Schnittpunkten der Straßen-Geometrien und

Kreisen mit [50; 40; 30; 20; 12,5] Meter Durchmesser wird abgesehen, da diese Werte identisch erstellt werden.

2.8 Anpassung des Maximum-Likelihood-Klassifikators

Die Anwendung des Maximum-Likelihood-Klassifikators wird im Kapitel 1.1.2.5 auf Seite 12 beschrieben. Um den Klassifikator anzupassen, wird erneut der Trainingsdatensatz mit 7000 Verkehrsunfällen unter Berücksichtigung der neu definierten Merkmale berechnet. Der entstehende Merkmalkatalog des Trainingsdatensatzes wird zum Anlernen des Klassifikators genutzt. Die folgenden Berechnungen des Klassifikators basieren auf dem aktualisierten und vergrößerten Trainingsdatensatz.

2.9 Selektierung der Ebene des Unfallortes

Diese Anpassung der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung wirkt sich ab der zweiten Klassifizierungsstufe aus. Straßen können durch einen Tunnel, über eine Brücke oder standardmäßig auf gleicher Ebene verlaufen. Straßen-Geometrien haben u.a. die Eigenschaften „Brücke“ und „Tunnel“. Ein „yes“ oder „NA“ definiert diese Eigenschaften. Der Straßen-Geometrie wird die Eigenschaft „Level“ hinzugefügt. Die folgende Tabelle 2-4 stellt die Definition der Eigenschaft „Level“ dar.

Tabelle 2-4: Definition der Eigenschaft „Level“ einer Straßen-Geometrie

Straßen-Geometrie	Brücke	Tunnel	Level
Straßen-Geometrie 1	NA	yes	1
Straßen-Geometrie 2	NA	NA	2
Straßen-Geometrie 3	yes	NA	3

Die Methode zur Klassifizierung definiert den Referenzpunkt, welcher in Kapitel 2.5 auf Seite 29 beschrieben wird, sowie dessen anliegende Straßen-Geometrien. Die Methode zur Klassifizierung nutzt das Level der Straßen-Geometrien am Referenzpunkt und vergleicht dieses mit dem Level der umliegenden Straßen-

Geometrien. Nur Straßen-Geometrien mit identischem Level werden weiterhin in den Berechnungen berücksichtigt.

2.10 Parameterbasierte Optimierungen

Um die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung weiterhin zu verbessern, werden bisherige Parameter in Schleife analysiert, verändert und ausgewertet. Verbessert die Modifikation die Klassifizierung in ihrer Gesamtheit, wird die Änderung des Parameters in diesem Unterkapitel dokumentiert. Die erste Optimierung wird in Tabelle 2-5 dargestellt. Sie zeigt die Anpassung der quadratischen Suchfeldgröße in Abhängigkeit von den Straßenklassen.

Tabelle 2-5: Definition der angepassten quadratischen Suchfeldgröße

Straßenklasse der Straßen-Geometrie	Kantenlänge [m]
primary	90
secondary	70
living street, motorway, motorway_link, primary_link, residential, road, secondary_link, service, tertiary, tertiary_link, track, trunk, trunk_link, unclassified	50
alle anderen Straßenklassen	50

Es gilt die quadratische Suchfeldgröße so klein wie möglich und nur so groß wie nötig für die jeweilige Straßenklasse zu definieren. Die anfängliche Definition der quadratischen Suchfeldgröße ist dem Kapitel 1.1.2.6 auf Seite 13 zu entnehmen.

Tabelle 2-6: Definition der angepassten Linienbreite

Straßenklasse der Straßen-Geometrie	Linienbreite [Pixel]
living street, motorway, motorway_link, primary, primary_link, residential, road, secondary, secondary_link, service, tertiary, tertiary_link, track, trunk, trunk_link, unclassified	5
alle anderen Straßenklassen	5

Die Tabelle 2-6 zeigt die zweite Optimierung. Sie beschreibt die Anpassung der Linienbreite in Abhängigkeit von den Straßenklassen. Alle Straßenklassen sind mit identischer Linienbreite definiert. Die ursprüngliche Definition der Linienbreite ist in Kapitel 1.1.2.7 auf Seite 13 dargestellt.

Weiterhin wurden die Merkmale $zerOL(vertical)$ und $zerOR(vertical)$ von dem Wert „40“ auf „25“ gesetzt. Die Merkmale sind in Kapitel 1.1.2.3 auf Seite 10 beschrieben.

2.11 Vorentscheidungen der zweiten Klassifizierungsstufe

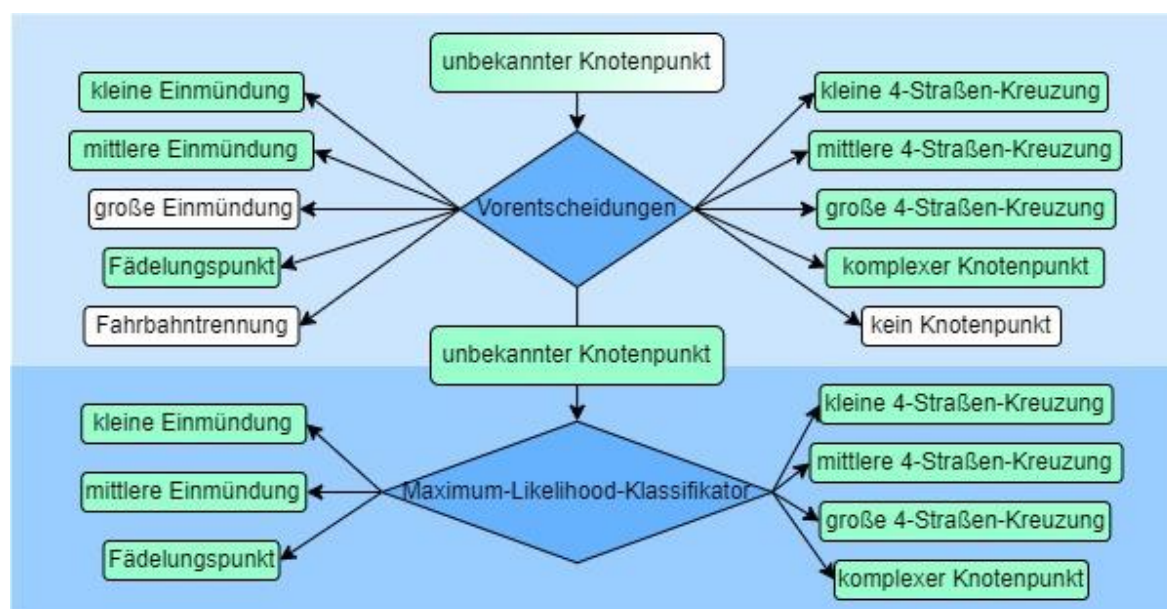


Bild 2-12: Veränderte zweite Klassifizierungsstufe der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung

Bild 2-12 auf Seite 41 zeigt die veränderte zweite Klassifizierungsstufe und ersetzt das bisherige Bild 1-7 auf Seite 12. Im ersten Schritt werden alle Knotenpunkte durch Vorentscheidungen klassifiziert. Damit ist die Klassifizierung für die große Einmündung, die Fahrbahntrennung und die Gruppe „kein Knotenpunkt“ abgeschlossen. Nachfolgend werden alle noch unbekanntes Knotenpunkte der verbleibenden Knotenpunkttypen durch den Maximum-Likelihood-Klassifikator, welcher im Kapitel 1.1.2.5 auf Seite 12 erläutert wird, klassifiziert. Im Folgenden wird beispielhaft erläutert, wie sich die Vorentscheidungen entwickelt haben. Die Vorentscheide wurden durch Auswertungen der Merkmale, wie in den folgenden beiden Bildern dargestellt, und mit Hilfe einer tabellarischen Analyse der 7000 Trainingsdaten definiert.

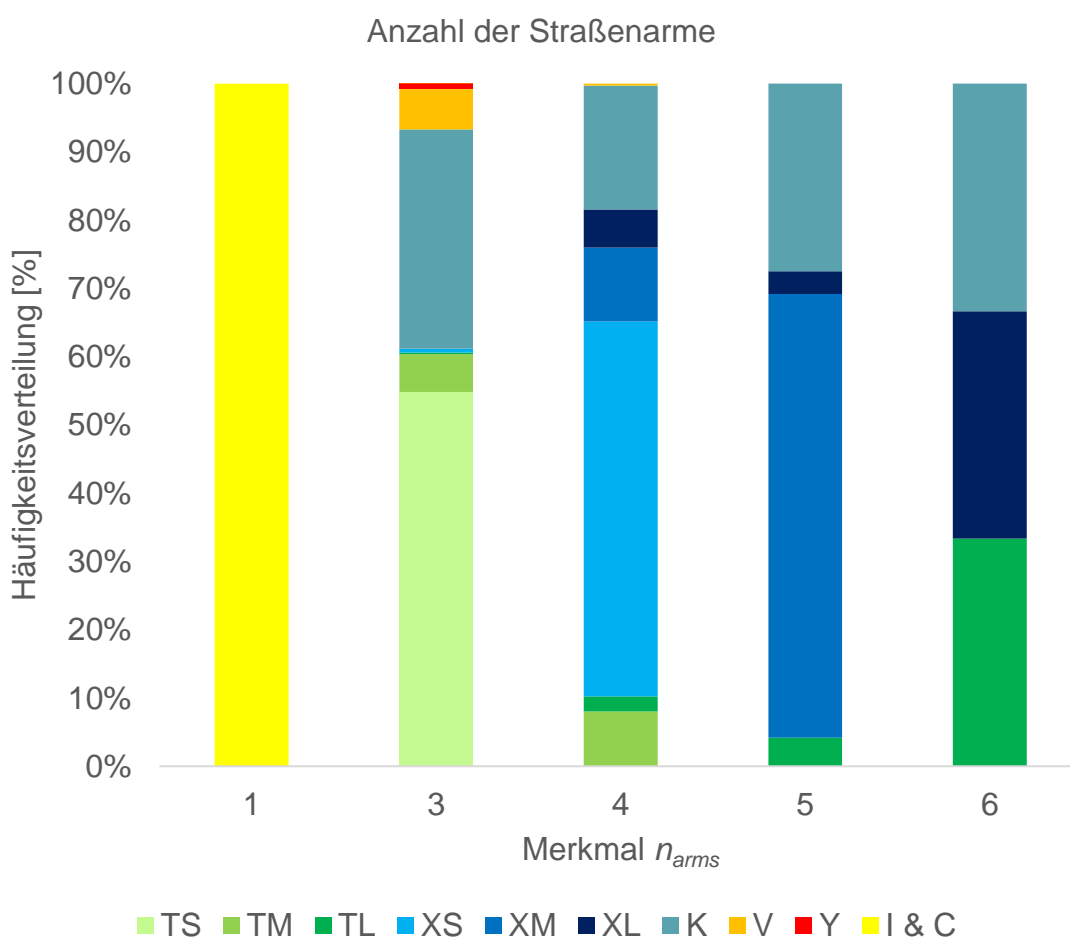


Bild 2-13: Häufigkeitsverteilung des Merkmals „Anzahl der Straßenarme“

Bild 2-13 zeigt, dass nur die Gruppe „kein Knotenpunkt“ (I & C, für Gerade und Kurve) einen Straßenarm aufweist. Demzufolge kann mit Hilfe der Vorentscheidung die Gruppe „kein Knotenpunkt“ klassifiziert werden.

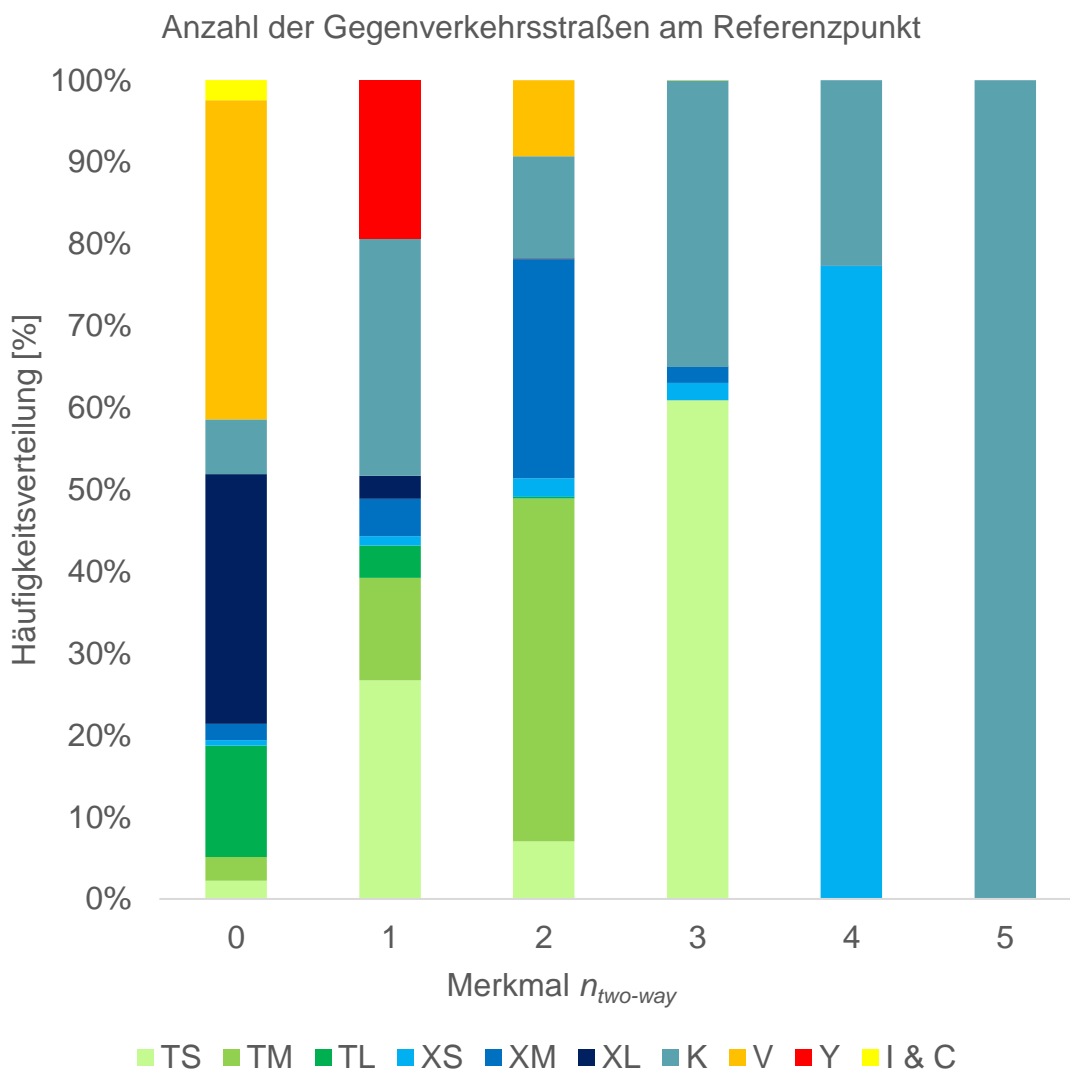


Bild 2-14: Häufigkeitsverteilung des Merkmals „Anzahl der Gegenverkehrsstraßen am Referenzpunkt“

Bild 2-14 zeigt, dass mit einer Vorentscheidung keine Gruppe vollumfänglich klassifiziert werden kann.

Die anschließende Tabelle 2-7 beschreibt die Definitionen aller Vorentscheidungen. Diese werden exakt in aufgeführter Reihenfolge angewendet.

Tabelle 2-7: Übersicht aller Vorentscheidungen

Knotenpunkttyp	Vorentscheidung
kein Knotenpunkt	$n_{arms} = 2$ $n_{arms} = 3; angle_{min} \leq 2,5; n_{cut-50-circle-all} = 2$
Fahrbahntrennung	$n_{arms} = 3; angle_{min} \leq 45; n_{two-way} = 1; n_{cut-50-circle-all} \leq 3$

Fädelungspunkt	$n_{arms} = 3; angle_{min} \leq 52,5; n_{two-way} = 0; n_{cut-50-circle-all} \leq 3$ $n_{arms} = 3; angle_{min} \leq 42,5; n_{two-way} = 2; n_{cut-50-circle-all} \leq 5$ $n_{arms} = 4; angle_{min} \leq 32,5; angle_{max} \leq 175; n_{two-way} = 2;$ $n_{cut-50-circle-bottom} + n_{cut-50-circle-top} = 0; n_{cut-50-circle-all} \leq 4$
kleine 4-Straßen-Kreuzung	$n_{arms} = 3; n_{two-way} = 3; cut_{all-site-50-circle} = 1; n_{cut-50-circle-all} = 4;$ $n_{cut-12,5-circle-all} = 4$
komplexer Knotenpunkt	$n_{arms} = 5; n_{two-way} = 5$ $n_{arms} \geq 6; n_{two-way} \geq 3$ $n_{arms} = 4; n_{two-way} = 4; angle_{max} \geq 155$ $n_{arms} = 3; n_{two-way} = 3; n_{cut-50-circle-all} \geq 4$
große Einmündung	$n_{max(horizontal)} = 2; n_{max(vertical)} = 2; zero_L(vertical) + zero_R(vertical) = 1;$ $n_{arms} \geq 3; n_{arms} \leq 5; n_{two-way} = 0$ $zero_L(vertical) + zero_R(vertical) = 1; n_{arms} = 4; n_{two-way} = 0$ $n_{max(vertical)} \geq 1; n_{max(vertical)} \leq 2; n_{arms} = 5; angle_{min} \geq 20;$ $n_{two-way} = 1$ $n_{max(horizontal)} = 2; n_{max(vertical)} = 2; n_{arms} = 5; n_{two-way} = 1;$ $cut_{all-site-12,5-circle} = 0$ $zero_L + zero_R = 1; n_{arms} = 4; n_{two-way} = 0; n_{cut-max-circle-left} = 2;$ $n_{cut-max-circle-right} = 2; n_{cut-max-circle-all} = 6$ $n_{arms} = 6; n_{two-way} = 0$
mittlere Einmündung	$n_{max(horizontal)} \geq 1; n_{arms} = 4; angle_{min} \leq 35; angle_{max} \geq 150;$ $n_{two-way} = 2; n_{cut-50-circle-all} = 4$
kleine Einmündung	$n_{arms} = 3; n_{two-way} = 3; n_{cut-50-circle-all} = 3$ $n_{arms} = 3; n_{two-way} = 1; n_{cut-50-circle-all} = 3$
kleine 4-Straßen-Kreuzung	$n_{arms} = 4; n_{two-way} = 4; n_{cut-50-circle-all} = 4$ $n_{arms} = 4; n_{two-way} = 3; n_{cut-50-circle-all} = 4$

mittlere 4-Straßen-Kreuzung	$n_{arms} = 4; angle_{max} < 145; n_{two-way} = 2; cut_{all-site-max-circle} = 1;$ $n_{cut-max-circle-all} = 6$ $n_{max(horizontal)} = 2; n_{max(vertical)} = 1; n_{arms} = 4; n_{two-way} = 2;$ $cut_{all-site-12,5-circle} = 1$ $n_{arms} = 4; n_{two-way} = 2; n_{cut-max-circle-bottom} = 1; n_{cut-max-circle-left} = 2;$ $n_{cut-max-circle-right} = 2; n_{cut-max-circle-top} = 1$ $n_{arms} = 4; n_{two-way} = 2; n_{cut-max-circle-bottom} = 2; n_{cut-max-circle-left} = 1;$ $n_{cut-max-circle-right} = 1; n_{cut-max-circle-top} = 2$ $n_{arms} = 4; angle_{max} < 150; n_{two-way} = 2; cut_{all-site-max-circle} = 1;$ $n_{cut-max-circle-all} = 6$
große 4-Straßen-Kreuzung	$zero_{L(vertical)} + zero_{R(vertical)} = 0; n_{arms} = 4; n_{two-way} = 0$ $n_{max(horizontal)} = 2; n_{max(vertical)} = 2; n_{arms} \geq 4; n_{arms} \leq 5;$ $n_{two-way} = 0; n_{cut-max-square-all} \geq 7; cut_{all-site-50-circle} = 1$ $n_{arms} = 4; n_{cut-max-square-bottom} = 2; n_{cut-max-square-left} = 2;$ $n_{cut-max-square-right} = 2; n_{cut-max-square-top} = 2; n_{two-way} = 0$ $n_{arms} = 6; n_{two-way} = 2$

Nach den Vorentscheidungen klassifiziert abschließend der Maximum-Likelihood-Klassifikator, die in Bild 2-12 auf Seite 41 gezeigten Knotenpunkttypen. Der Klassifikator wurde nunmehr mit den 7000 Trainingsdaten angelernet und verwendet die folgenden Merkmale: $angle_{max}$, $angle_{min}$, $cut_{all-site-x-circle}$, $cut_{all-site-x-square}$, n_{arms} , $n_{cut-x-circle-all}$, $n_{cut-x-circle-bottom}$, $n_{cut-x-circle-left}$, $n_{cut-x-circle-right}$, $n_{cut-x-circle-top}$, $n_{cut-x-square-all}$, $n_{cut-x-square-bottom}$, $n_{cut-x-square-left}$, $n_{cut-x-square-right}$, $n_{cut-x-square-top}$, $n_{identical-point-all}$, $n_{identical-point-2}$, $n_{identical-point-3}$, $n_{identical-point-4}$, $n_{identical-point-5}$, $n_{identical-point-6}$, $n_{identical-y}$, n_{max} , $n_{two-way}$, $n_{one-way}$, $ratio_{area}$, $ratio_{peak}$, $zero_{L(vertical)}$, $zero_{R(vertical)}$, μ für x gleich [max; 50; 40; 30; 20; 12,5] Meter Durchmesser, mit „max“ in Abhängigkeit der Straßenklasse aus Tabelle 2-5 auf Seite 40.

2.12 Anwendung der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung auf die Region Deutschland

Durch die in Kapitel 2.1 auf Seite 22 beschriebene Erweiterung der bisherigen Methode zur Klassifizierung, kann die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung auf die gesamte Region Deutschland angewendet werden. Wie in Kapitel 1.1.1 auf Seite 2 beschrieben, werden die Daten der Verkehrsunfälle von Unfallatlas verwendet. Da diese für die komplette Region Deutschland erst ab dem Jahr 2020 vollständig eingepflegt sind, werden die Daten der Verkehrsunfälle der Jahre 2020 bis 2022 verwendet. Analysiert werden die absolute und relative Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Bezug auf die Knotenpunkttypen dieser drei Jahre. Weiterhin wird die Häufigkeitsverteilung der Knotenpunkttypen des Jahres 2020 in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse untersucht. Abschließend wird eine Analyse der Verkehrsunfälle mit Getöteten zur Häufigkeitsverteilung der Knotenpunkttypen des Jahres 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes durchgeführt.

2.13 Konzept zur Klassifizierung aller niveaugleichen Knotenpunkte im deutschen Straßennetz

Mit der gewonnenen Erfahrung während des Bearbeitungsprozesses der Methode zur Klassifizierung und dem erlangten Wissen zur Abfrage von Kartendaten wurde ein Konzept entwickelt, um alle niveaugleichen Knotenpunkte im deutschen Straßennetz zu klassifizieren.

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden alle Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt und die Forschungsfragen auf Seite 21 beantwortet.

3.1 Erweiterung der bisherigen Methode zur Klassifizierung auf die Region Deutschland

Durch eine interne Anpassung der lokalen OpenStreetMap-Datenbank am Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI war es möglich, die Datenbank mit einer deutlich größeren Menge von Kartendaten zu verwenden. Nach dem Einpflegen der frei verfügbaren OpenStreetMap-Kartendaten der Region Deutschland von Geofabrik wurde die lokale OpenStreetMap-Datenbank auf die gesamte Region Deutschland erweitert. Versuche haben gezeigt, dass keine weiteren Anpassungen der lokalen OpenStreetMap-Datenbank notwendig waren. Infolgedessen kann die bisherige Methode zur Klassifizierung mit beliebigen Koordinaten aus allen Bundesländern in Deutschland verwendet werden. Damit wird die Forschungsfrage 1: „Ist die bisherige Methode zur Klassifizierung auf das gesamte deutsche Straßennetz anwendbar?“, positiv beantwortet.

3.2 Übersicht der Knotenpunkttypen

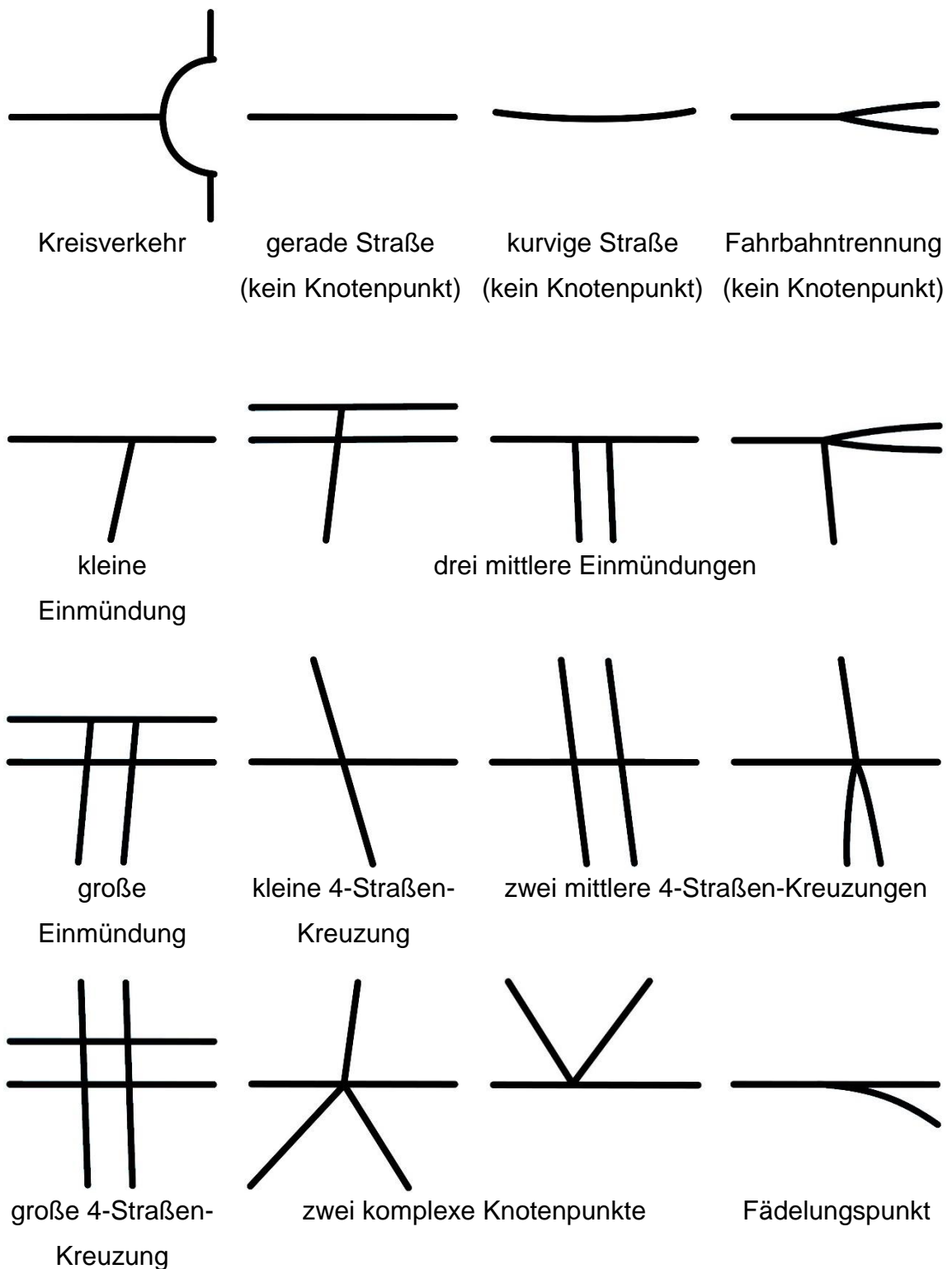


Bild 3-1: Übersicht klassifizierbarer Knotenpunkttypen

Bild 3-1 und Anhang 3 auf Seite A3 zeigen Beispiele der klassifizierbaren Knotenpunkttypen. Die folgenden Klassifizierungen sind möglich: Gruppe „kein

Knotenpunkt“ mit gerader und kurviger Straße; Kreisverkehr; kleine, mittlere und große Einmündung; kleine, mittlere und große 4-Straßen Kreuzung; komplexer Knotenpunkt; Fädelungspunkt und Fahrbahntrennung. Gerade Straße, kurvige Straße und Fahrbahntrennung sind keine Knotenpunkte, sie werden für eine vollständige Darstellung mit aufgeführt. Der Fädelungspunkt ist ein Konfliktpunkt und Teil eines Knotenpunktes.

Tabelle 3-1: Vergleich der Klassifizierungen zwischen bisheriger und weiterentwickelter Methode

bisherige Methode zur Klassifizierung	weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung	Definition
erste Klassifizierungsstufe		
	gerade Straße (kein Knotenpunkt)	I
	kurvige Straße (kein Knotenpunkt)	C
	Kreisverkehr	O
zweite Klassifizierungsstufe		
Einmündung	kleine Einmündung	TS
-	mittlere Einmündung	TM
-	große Einmündung	TL
4-Straßen-Kreuzung	kleine 4-Straßen-Kreuzung	XS
-	mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XM
	große 4-Straßen-Kreuzung	XL
	komplexe Kreuzung	K
-	Fädelungspunkt (Konfliktpunkt)	V
-	Fahrbahntrennung (kein Knotenpunkt)	Y
	kein Knotenpunkt (gerade und kurvige Straße)	I & C

In Tabelle 3-1 werden die bisherige und die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung verglichen. Die Forschungsfrage 2: „Können weitere niveaugleiche

Knotenpunkttypen zur Klassifizierung eingeführt werden?“, lässt sich anhand Bild 3-1 auf Seite 48, Anhang 3 auf Seite A3 und Tabelle 3-1 auf Seite 49 mit „Ja“ beantworten.

3.3 Aufbau eines Trainings- und Testdatensatzes auf 10000 manuell klassifizierte Knotenpunkte

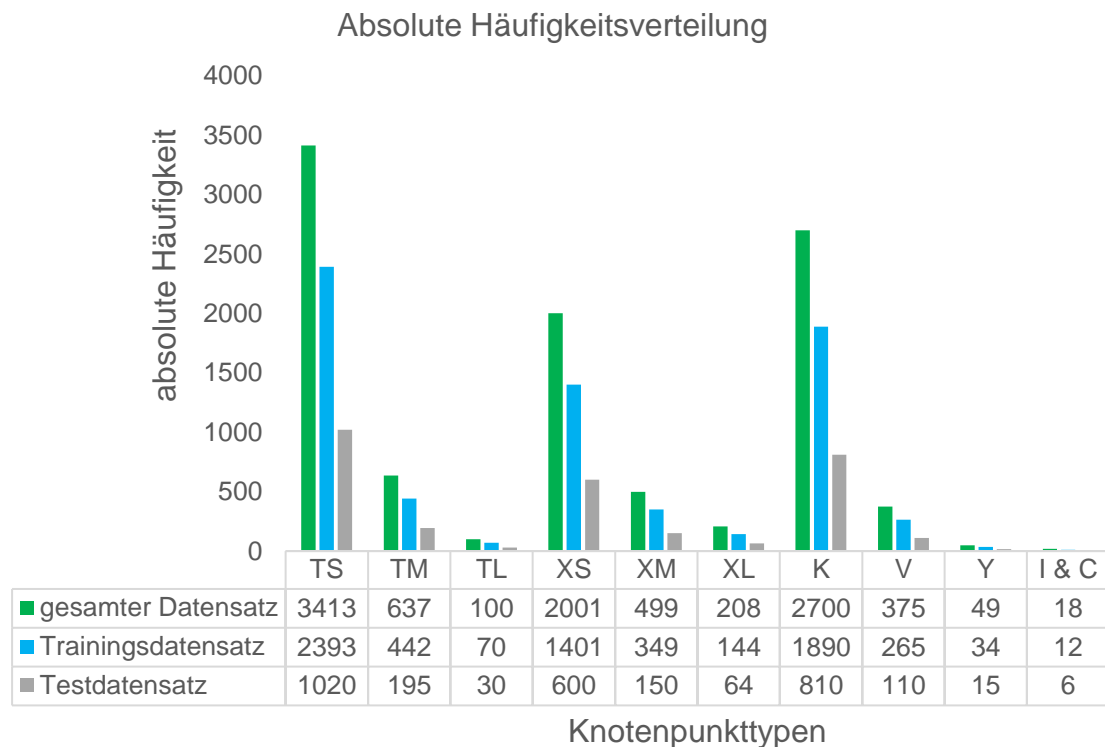


Bild 3-2: Absolute Häufigkeitsverteilung der Knotenpunkttypen

Bild 3-2 zeigt die absolute Häufigkeitsverteilung des gesamten Datensatzes, des Trainings- und des Testdatensatzes. Der gesamte Datensatz besteht aus 10000 manuell klassifizierten Knotenpunkten, unterteilt in einen Trainingsdatensatz aus 7000 und einem Testdatensatz aus 3000 Knotenpunkten. Die Verteilung entspricht 70 zu 30 Prozent. Die Datensätze sind in zehn Klassen aufgeteilt. Die drei häufigsten Knotenpunkttypen sind die kleine Einmündung, der komplexe Knotenpunkt und die kleine 4-Straßen-Kreuzung. Danach kommt die mittlere Einmündung, knapp gefolgt von der mittleren 4-Straßen-Kreuzung, abschließend der Fädelungspunkt. Die geringsten Anzahlen von Knotenpunkten haben die große Einmündung, die Fahrbahntrennung und die Gruppe „kein Knotenpunkt“. Somit

kann die Forschungsfrage 3: „Ist es möglich einen Trainings- und Testdatensatz mit insgesamt 10000 manuell klassifizierten Knotenpunkten aufzubauen?“, mit einem „Ja“ beantwortet werden.

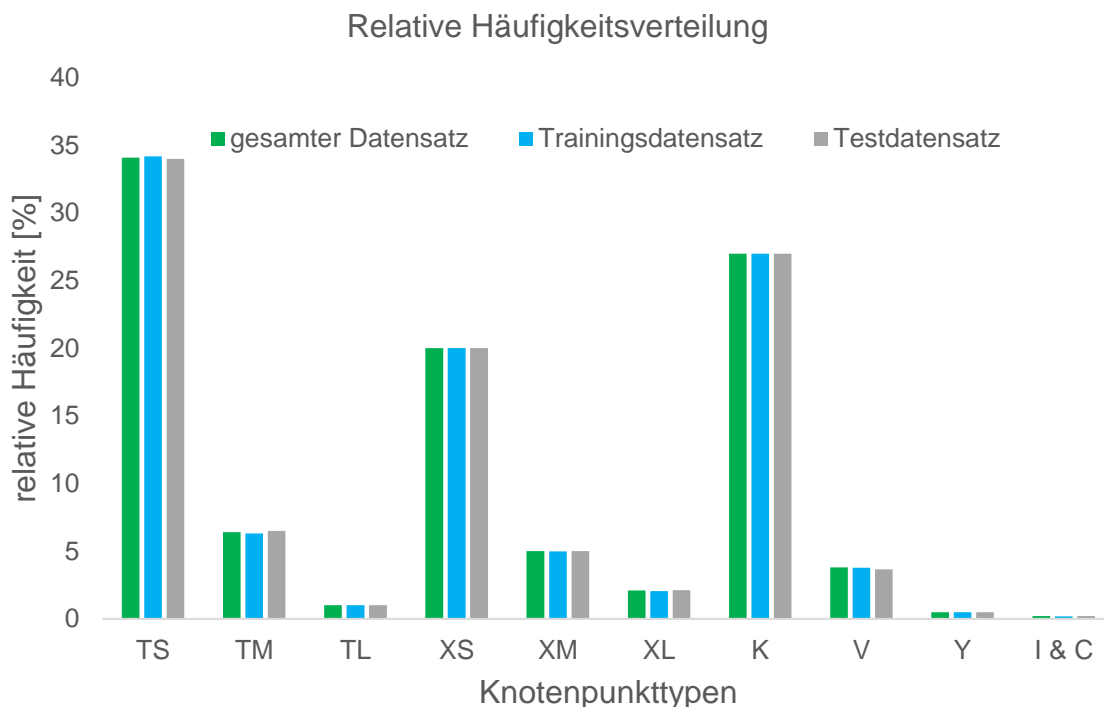


Bild 3-3: Relative Häufigkeitsverteilung der Knotenpunkttypen

In Bild 3-3 sind die relativen Häufigkeiten des gesamten Datensatzes, des Trainings- und des Testdatensatzes dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die relativen Häufigkeiten für den Trainings- und Testdatensatz identisch sind. Die Verteilung zufällig gewählter Knotenpunkte des gesamten Datensatzes dient hierbei als Referenz. Zusammenfassend werden die Werte der absoluten und relativen Häufigkeiten in Anhang 5 auf Seite A5 gezeigt. Daraus ist zu entnehmen, dass die Abweichung der relativen Häufigkeit jeder Klasse des Trainings- und Testdatensatzes zum gesamten Datensatz nur 0,1 Prozent abweicht. Dieser Wert ist so klein, dass eine mögliche Unteranpassung ausgeschlossen werden kann. Eine Überanpassung kann ebenfalls ausgeschlossen werden, da der Datensatz per Zufall aufgeteilt wurde. Zusammenfassend kann die Forschungsfrage 4: „Besteht das Problem einer Unter- oder Überanpassung des Trainings- und Testdatensatzes?“, mit „Nein“ beantwortet werden.

3.4 Anfangszustand der bisherigen Methode zur Klassifizierung

Tabelle 3-2: Konfusionsmatrix (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten)

Ist \ Soll						Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
	Einmündung	4-Straßen-Kreuzung	große 4-Straßen-Kreuzung	komplexer Knotenpunkt	kein Knotenpunkt	
Einmündung	703	19	0	174	1	897
4-Straßen-Kreuzung	156	369	0	42	0	567
große 4-Straßen-Kreuzung	52	81	17	250	0	400
komplexer Knotenpunkt	54	124	47	334	1	560
kein Knotenpunkt	55	7	0	10	4	76
Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)	1020	600	64	810	6	2500

Die Tabelle 3-2 zeigt den Vergleich zwischen den Referenzdaten und den klassifizierten Daten der bisherigen Methode zur Klassifizierung.

Tabelle 3-3: Kennzahlen (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten)

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
Einmündung	68,9	78,4	80,2
4-Straßen-Kreuzung	61,5	65,1	88,0
große 4-Straßen-Kreuzung	26,6	4,3	97,8
komplexer Knotenpunkt	41,2	59,6	75,5
kein Knotenpunkt	66,7	5,3	99,9

positive Erkennungsrate = 57,1 % (Anfangszustand)

negative Erkennungsrate = 89,3 % (Anfangszustand)

Korrektklassifikationsrate = 82,8 % (Anfangszustand)

In Tabelle 3-3 auf Seite 52 sind die Kennzahlen der bisherigen Methode zur Klassifizierung dargestellt. Die Richtig-positiv-Rate beträgt für die großen 4-Straßen-Kreuzungen lediglich 26,6 Prozent und für die komplexen Knotenpunkte 41,2 Prozent. Der positive Vorhersagewert der großen 4-Straßen-Kreuzungen und der Klasse „kein Knotenpunkt“ liegt unter 6 Prozent. Für die bisherige Methode zur Klassifizierung beträgt die positive Erkennungsrate 57,1 Prozent und die negative Erkennungsrate 89,3 Prozent. Die Korrektklassifikationsrate liegt bei 82,8 Prozent. Die Forschungsfrage 5: „Wie hoch ist die Korrektklassifikationsrate des Anfangszustandes der Methode zur Klassifizierung?“, ist damit beantwortet.

3.5 Zentrierung um den nächstgelegenen identischen Punkt

Tabelle 3-4: Konfusionsmatrix (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten, Zentrierung)

Soll						
Ist	Einmündung	4-Straßen-Kreuzung	große 4-Straßen-Kreuzung	komplexer Knotenpunkt	kein Knotenpunkt	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
Einmündung	700	20	0	168	1	889
4-Straßen-Kreuzung	153	367	0	45	0	565
große 4-Straßen-Kreuzung	50	74	20	242	0	386
komplexer Knotenpunkt	64	132	44	345	1	586
kein Knotenpunkt	53	7	0	10	4	74
Spaltensumme (Summe der Referenzdatendaten)	1020	600	64	810	6	2500

Die Tabelle 3-4 zeigt den Vergleich zwischen den Referenzdaten und den klassifizierten Daten der bisherigen Methode zur Klassifizierung mit der Zentrierung um den nächstliegenden identischen Punkt.

Tabelle 3-5: Kennzahlen (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten, Zentrierung)

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
Einmündung	68,6	78,7	80,1
4-Straßen-Kreuzung	61,2	65,0	88,0
große 4-Straßen-Kreuzung	31,3	5,2	97,9
komplexer Knotenpunkt	42,6	58,9	75,7
kein Knotenpunkt	66,7	5,4	99,9

positive Erkennungsrate = 57,4 % (+0,3 % zu Tabelle 3-3 auf Seite 52)

negative Erkennungsrate = 89,4 % (+0,1 % zu Tabelle 3-3 auf Seite 52)

Korrektklassifikationsrate = 83,0 % (+0,2 % zu Tabelle 3-3 auf Seite 52)

In Tabelle 3-5 sind die Kennzahlen der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung mit der Optimierung „Zentrierung“ angegeben. Die positive Erkennungsrate liegt bei 57,4 Prozent und die negative Erkennungsrate bei 89,4 Prozent. Die Korrektclassifikationsrate beträgt 83,0 Prozent. Die Zentrierung ab der zweiten Klassifizierungsstufe führt zu einer standardisierten Ausgangslage für die Berechnungen der Methode zur Klassifizierung und verbessert die Klassifizierung. Weiterhin hilft diese Entwicklung neue Merkmale zu erstellen und neue Knotenpunkttypen einzuführen. In der Folge wird die Version mit der Zentrierung um den nächstliegenden identischen Punkt der neue Stand der Methode zur Klassifizierung. Die Forschungsfrage 6: „Verbessert die Zentrierung um den nächstgelegenen identischen Punkt die bisherige Methode zur Klassifizierung?“, kann mit den beschriebenen Vorteilen, der Tabelle 3-4 auf Seite 53 und der Tabelle 3-5 beantwortet werden.

3.6 Abgrenzung der verbundenen Fahrbahnen

Tabelle 3-6: Konfusionsmatrix (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten, Zentrierung, Verbund)

Soll \ Ist	Einmündung	4-Straßen-Kreuzung	große 4-Straßen-Kreuzung	komplexer Knotenpunkt	kein Knotenpunkt	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
Einmündung	764	21	0	207	3	995
4-Straßen-Kreuzung	110	372	0	44	0	526
große 4-Straßen-Kreuzung	28	78	19	228	0	353
komplexer Knotenpunkt	57	128	45	322	0	552
kein Knotenpunkt	61	1	0	9	3	74
Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)	1020	600	64	810	6	2500

Tabelle 3-6 stellt den Vergleich zwischen den Referenzdaten und den klassifizierten Daten der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung mit der Optimierung „Verbund“ dar.

Tabelle 3-7: Kennzahlen (500 Trainingsdaten, 2500 Testdaten, Zentrierung, Verbund)

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
Einmündung	74,9	76,8	83,0
4-Straßen-Kreuzung	62,0	70,7	88,4
große 4-Straßen-Kreuzung	29,7	5,4	97,9
komplexer Knotenpunkt	39,8	58,3	74,9
kein Knotenpunkt	50,0	4,1	99,9

positive Erkennungsrate = 59,2 % (+1,8 % zu Tabelle 3-5 auf Seite 54)

negative Erkennungsrate = 89,8 % (+0,4 % zu Tabelle 3-5 auf Seite 54)

Korrektklassifikationsrate = 83,7 % (+0,7 % zu Tabelle 3-5 auf Seite 54)

Die Tabelle 3-7 zeigt die Kennzahlen der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung mit der Optimierung „Verbund“. Die positive Erkennungsrate beträgt 59,2 Prozent und die negative Erkennungsrate 89,8 Prozent. Die Korrekturklassifikationsrate entspricht 83,7 Prozent. Die Optimierung „Verbund“ beeinflusst die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung durch Entfernung unnötiger Straßen-Geometrien ab der ersten Klassifizierungsstufe. Größter Vorteil für die erste Klassifizierungsstufe ist die Steigerung der Klassifizierung zwischen geraden und kurvigen Straßen, da mehrbahnige unverbundene Straßen-Geometrien diese Klassifizierung erschweren. In der zweiten Klassifizierungsstufe hilft die Optimierung „Verbund“ die Klassifizierung zu verbessern. Zusätzlich ist diese Weiterentwicklung die Basis für die Erstellung neuer Merkmale und Knotenpunkttypen. Deshalb wird die Optimierung „Verbund“ in die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung eingearbeitet. Die Forschungsfrage 7: „Hilft eine Separierung der verbundenen Straßen die Methode zur Klassifizierung zu optimieren?“, wird mit den geschilderten Vorteilen, der Tabelle 3-6 auf Seite 55 und der Tabelle 3-7 beantwortet.

3.7 Eingeführte Merkmale

Tabelle 3-8: Eingeführte Merkmale

Merkmalsname	Beschreibung
$angle_{max}, angle_{min}$	größter und kleinster Winkel zwischen nebeneinanderliegenden Straßenarmen
$cut_{all-site-x-circle}, n_{cut-x-circle-all},$ $n_{cut-x-circle-bottom}, n_{cut-x-circle-left},$ $n_{cut-x-circle-right}, n_{cut-x-circle-top}$	logische Aussage, ob sich Straßen mit jedem 90-Grad-Kreisbogen schneiden; Anzahl aller Schnittpunkte mit dem Kreis; Anzahl der Schnittpunkte je 90-Grad-Kreisbogen; für x gleich [50; 40; 30; 20; 12,5] Meter Durchmesser und für x gleich maximaler Durchmesser siehe Tabelle 2-5 auf Seite 40
$cut_{all-site-x-square}, n_{cut-x-square-all},$ $n_{cut-x-square-bottom}, n_{cut-x-square-left},$ $n_{cut-x-square-right}, n_{cut-x-square-top}$	logische Aussage, ob sich Straßen mit jeder Seite des Quadrates schneiden; Anzahl aller Schnittpunkte mit dem Quadrat; Anzahl der Schnittpunkte je Seite; für x gleich 50 Meter Kantenlänge und für x gleich maximale Kantenlänge siehe Tabelle 2-5 auf Seite 40
n_{arms}	Anzahl der Straßenarme
$n_{identical-point-x}$	Anzahl der Häufigkeiten zweifach bis sechsfach überlagerter Punkte mit x gleich [2; 3; 4; 5; 6]
$n_{two-way}, n_{one-way}$	Anzahl der Gegenverkehrsstraßen und Richtungsfahrbahnen am Referenzpunkt

Die Tabelle 3-8 beschreibt alle eingeführten Merkmale. Die Forschungsfrage 8: „Können weitere Merkmale zur Klassifizierung eingeführt werden?“, lässt sich mit der Tabelle 3-8 beantworten.

3.8 Stand der Methode zur Klassifizierung mit eingeführten Knotenpunkttypen und neu angelerntem Maximum-Likelihood-Klassifikator

Tabelle 3-9: Konfusionsmatrix (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, Maximum-Likelihood-Klassifikator)

Ist \ Soll											
	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
TS	933	9	0	0	0	0	189	4	0	0	1135
TM	31	163	18	0	0	0	16	1	0	0	229
TL	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
XS	0	0	0	518	0	0	75	0	0	0	593
XM	0	0	0	21	139	3	49	0	0	0	212
XL	0	0	0	1	2	60	56	0	0	0	119
K	42	23	9	59	9	1	418	13	3	0	577
V	14	0	0	1	0	0	7	92	7	0	121
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5
I & C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6
SPS	1020	195	30	600	150	64	810	110	15	6	3000

SPS – Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)

In der Tabelle 3-9 ist der Vergleich zwischen den Referenzdaten und den klassifizierten Daten des aktuellen Standes der Methode zur Klassifizierung mit eingeführten Knotenpunkttypen und mit neu angelerntem Maximum-Likelihood-Klassifikator dargestellt.

Tabelle 3-10: Kennzahlen (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, Maximum-Likelihood-Klassifikator)

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
kleine Einmündung	91,5	82,2	95,3
mittlere Einmündung	83,6	71,2	98,8
große Einmündung	10,0	100,0	99,1
kleine 4-Straßen-Kreuzung	86,3	87,4	96,6
mittlere 4-Straßen-Kreuzung	92,7	65,6	99,6
große 4-Straßen-Kreuzung	93,8	50,4	99,9
komplexer Knotenpunkt	51,6	72,4	83,8
Fädelpunkt	83,6	76,0	99,4
Fahrbahntrennung	33,3	100,0	99,7
kein Knotenpunkt	100,0	100,0	100,0

positive Erkennungsrate = 77,9 % (+18,2 % zu Tabelle 3-7 auf Seite 56)

negative Erkennungsrate = 97,5 % (+7,7 % zu Tabelle 3-7 auf Seite 56)

Korrektklassifikationsrate = 95,6 % (+11,9 % zu Tabelle 3-7 auf Seite 56)

In Tabelle 3-10 sind die Kennzahlen der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung angegeben. Die Richtig-positiv-Rate für große Einmündungen beträgt nur 10 Prozent und für die Fahrbahntrennungen 33,3 Prozent. Demgegenüber wird die Klasse „kein Knotenpunkt“ zu 100 Prozent klassifiziert. Die positive Erkennungsrate liegt bei 77,9 Prozent und die negative Erkennungsrate bei 97,5 Prozent. Die Korrektklassifikationsrate beträgt 95,6 Prozent. Trotz Vergrößerung der Anzahl auf zehn Knotenpunkttypen hat sich die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung markant verbessert. Zurückzuführen ist dies auf den neu angelernten Maximum-Likelihood-Klassifikator mit nunmehr 7000 statt 500 Trainingsdaten und die Erweiterung der Merkmale. Auch eine detailliertere Aufschlüsselung der Knotenpunkttypen von kleiner, mittlerer und großer Einmündung, wie auch 4-Straßen-Kreuzungen steigert die Klassifizierung, da der Maximum-Likelihood-Klassifikator exaktere Kennzahlen eines Knotenpunkttyps erhält. Die Forschungsfrage 9: „Wie hoch ist die Korrektklassifikationsrate der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung, nachdem die Knotenpunkttypen

eingeführt und der Maximum-Likelihood-Klassifikator neu angelernt wurde?“, kann mit der Tabelle 3-10 auf Seite 59 beantwortet werden.

3.9 Separierung der Ebene des Unfallortes

Tabelle 3-11: Konfusionsmatrix (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, Ebene, Maximum-Likelihood-Klassifikator)

Ist \ Soll											Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	
TS	957	14	0	0	0	0	237	6	0	0	1214
TM	19	162	20	0	1	0	15	1	0	0	218
TL	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
XS	0	0	0	516	0	0	73	0	0	0	589
XM	0	0	0	16	136	6	63	0	0	0	221
XL	0	0	2	0	0	54	41	0	0	0	97
K	32	19	5	66	12	2	368	16	3	0	523
V	8	0	0	1	0	0	6	85	7	0	107
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5
I & C	4	0	0	1	1	2	7	2	0	6	23
SPS	1020	195	30	600	150	64	810	110	15	6	3000

SPS – Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)

Die Tabelle 3-11 zeigt den Vergleich zwischen den Referenzdaten und den klassifizierten Daten des aktuellen Standes der Methode zur Klassifizierung mit der Optimierung „Ebene“.

Tabelle 3-12: Kennzahlen (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, Ebene, Maximum-Likelihood-Klassifikator)

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
kleine Einmündung	93,8	78,8	96,5
mittlere Einmündung	83,1	74,3	98,8
große Einmündung	10,0	100,0	99,1
kleine 4-Straßen-Kreuzung	86,0	87,6	96,5
mittlere 4-Straßen-Kreuzung	90,7	61,5	99,5
große 4-Straßen-Kreuzung	84,4	55,7	99,7
komplexer Knotenpunkt	45,4	70,4	82,2
Fädelpunkt	77,3	79,4	99,1
Fahrbahntrennung	33,3	100,0	99,7
kein Knotenpunkt	100,0	26,1	100,0

positive Erkennungsrate = 76,4% (-1,5 % zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

negative Erkennungsrate = 97,4 % (-0,1 % zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

Korrektklassifikationsrate = 95,3% (-0,3 % zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

In Tabelle 3-12 sind die Kennzahlen der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung mit der Optimierung „Ebene“ dargestellt. Die positive Erkennungsrate liegt bei 76,4 Prozent und die negative Erkennungsrate bei 97,4 Prozent. Die Korrektklassifikationsrate entspricht 95,3 Prozent. Insgesamt haben sich die Kennzahlen der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung gegenüber dem vorherigen Stand verringert, deshalb wird die Optimierung „Ebene“ nicht in die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung implementiert. Der im Kapitel 3.8 ab Seite 58 beschriebene Stand der Methode zur Klassifizierung bleibt weiterhin aktuell. Die Forschungsfrage 10: „Verbessert nur die Betrachtung der selektierten Ebenen des Referenzpunktes die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung?“, wird durch Tabelle 3-11 auf Seite 60 und der Tabelle 3-12 beantwortet.

3.10 Parameterbasierte Optimierungen

Die erste parameterbasierte Optimierung erfolgte durch die Anpassung der quadratischen Suchfeldgröße in Abhängigkeit von den Straßenklassen. Die

Ergebnisse sind in der Konfusionsmatrix in Anhang 6 auf Seite A6 und mit den Kennzahlen in Anhang 7 auf Seite A7 dokumentiert.

Die zweite parameterbasierte Optimierung ist die Anpassung der Linienbreite. Ergebnisse des Versuchs mit einheitlich zehn Pixel Linienbreite wurden in der Konfusionsmatrix in Anhang 8 auf Seite A8 und mit den Kennzahlen in Anhang 9 auf Seite A9 dargestellt.

Die Ergebnisse der parameterbasierten Optimierung mit gleichmäßig fünf Pixel Linienbreite sind in der Konfusionsmatrix in Anhang 10 auf Seite A10 und mit den Kennzahlen in Anhang 11 auf Seite A11 angegeben. Die Auswertungen der Ergebnisse der unterschiedlichen Linienbreiten zeigen, dass die Linienbreite mit fünf Pixel die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung verbessert und deshalb für diese definiert wird.

Die letzte parameterbasierte Optimierung ist die Änderung der Merkmale $zero_{L(vertical)}$ und $zero_{R(vertical)}$ auf den Wert „25“. Die Ergebnisse aller parameterbasierten Optimierungen werden in den folgenden Tabellen vorgestellt.

Tabelle 3-13: Konfusionsmatrix (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, alle Optimierungen, Maximum-Likelihood-Klassifikator)

Soll \ Ist	Ist										
	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	V - Fädelpunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
TS	941	1	0	0	0	0	123	1	0	0	1066
TM	20	176	13	0	0	0	41	0	0	0	250
TL	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
XS	0	0	0	534	0	0	73	0	0	0	607
XM	0	0	0	13	134	6	51	0	0	0	204
XL	0	0	0	1	0	52	31	0	0	0	84
K	46	18	14	50	16	6	485	11	3	0	649
V	13	0	0	2	0	0	6	98	8	0	127
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4
I & C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6
SPS	1020	195	30	600	150	64	810	110	15	6	3000

SPS – Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)

Tabelle 3-13 zeigt den Vergleich zwischen den Referenzdaten und den klassifizierten Daten des aktuellen Standes der Methode zur Klassifizierung mit allen parameterbasierten Optimierungen.

Tabelle 3-14: Kennzahlen (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, alle Optimierungen, Maximum-Likelihood-Klassifikator)

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
kleine Einmündung	92,3	88,3	95,9
mittlere Einmündung	90,3	70,4	99,3
große Einmündung	10,0	100,0	99,1
kleine 4-Straßen-Kreuzung	89,0	88,0	97,2
mittlere 4-Straßen-Kreuzung	89,3	65,7	99,4
große 4-Straßen-Kreuzung	81,3	61,9	99,6
komplexer Knotenpunkt	59,9	74,7	86,2
Fädelpunkt	89,1	77,2	99,6
Fahrbahntrennung	26,7	100,0	99,6
kein Knotenpunkt	100,0	100,0	100,0

positive Erkennungsrate = 81,1 % (+3,2 % zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

negative Erkennungsrate = 97,9 % (+0,4 % zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

Korrektklassifikationsrate = 96,2 % (+0,6% zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

Die Kennzahlen der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung mit allen parameterbasierten Optimierungen werden in Tabelle 3-14 dokumentiert. Die positive Erkennungsrate ist um 3,2 Prozent auf 81,1 Prozent gestiegen. Die negative Erkennungsrate beträgt 97,9 Prozent und die Korrektklassifikationsrate 96,2 Prozent. Die Forschungsfrage 11: „Welche Auswirkungen haben parametrische Optimierungen auf die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung?“, kann mit Hilfe der Tabelle 3-13 auf Seite 63 und der Tabelle 3-14 beantwortet werden.

3.11 Endzustand der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung nach Einführung der Vorentscheidungen der zweiten Klassifizierungsstufe

Tabelle 3-15: Konfusionsmatrix (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, alle Optimierungen, Vorentscheide, Maximum-Likelihood-Klassifikator)

Soll \ Ist	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
	TS	TM	TL	XS	XM	XL	K	V	Y	I & C	
TS	951	1	0	0	0	0	26	0	0	0	978
TM	1	173	2	0	0	0	9	0	0	0	185
TL	0	3	26	0	0	3	11	0	0	0	43
XS	0	0	0	571	0	0	78	0	0	0	649
XM	0	0	0	10	136	3	41	0	0	0	190
XL	0	0	0	1	0	54	36	0	0	0	91
K	66	18	2	18	14	4	607	4	1	0	734
V	2	0	0	0	0	0	2	106	0	0	110
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	14
I & C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6
SPS	1020	195	30	600	150	64	810	110	15	6	3000

SPS – Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)

In der Tabelle 3-15 wird der Vergleich zwischen den Referenzdaten und den klassifizierten Daten des Endzustandes der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung mit Einführung der Vorentscheidungen der zweiten Klassifizierungsstufe dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass es in Bezug auf die komplexen Knotenpunkte viele „falsch-positive“ und „falsch-negative“ Werte gibt.

Tabelle 3-16: Kennzahlen (7000 Trainingsdaten, 3000 Testdaten, Zentrierung, Verbund, alle Optimierungen, Vorentscheide, Maximum-Likelihood-Klassifikator)

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
kleine Einmündung	93,2	97,2	96,6
mittlere Einmündung	88,7	93,5	99,2
große Einmündung	86,7	60,5	99,9
kleine 4-Straßen-Kreuzung	95,2	88,0	98,8
mittlere 4-Straßen-Kreuzung	90,7	71,6	99,5
große 4-Straßen-Kreuzung	84,4	59,3	99,7
komplexer Knotenpunkt	74,9	82,7	91,0
Fädelpunkt	96,4	96,4	99,9
Fahrbahntrennung	93,3	100,0	100,0
kein Knotenpunkt	100,0	100,0	100,0

positive Erkennungsrate = 88,1 % (+7,0 % zu Tabelle 3-14 auf Seite 64,
+31,0 % zu Anfangszustand von Tabelle 3-3 auf Seite 52)

negative Erkennungsrate = 98,7 % (+0,8 % zu Tabelle 3-14 auf Seite 64,
+9,4 % zu Anfangszustand von Tabelle 3-3 auf Seite 52)

Korrektklassifikationsrate = 97,6 % (+1,4 % zu Tabelle 3-14 auf Seite 64,
+14,8 % zu Anfangszustand von Tabelle 3-3 auf Seite 52)

Tabelle 3-16 zeigt die Kennzahlen des Endzustandes der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung mit eingeführten Vorentscheidungen in der zweiten Klassifizierungsstufe. Die positive Erkennungsrate beträgt 88,1 Prozent, sie hat sich um 31,0 Prozent gegenüber dem Anfangszustand verbessert. Die negative Erkennungsrate entspricht 98,7 Prozent, dies ist eine Gesamtverbesserung von 9,4 Prozent. Die Korrektklassifikationsrate erreicht 97,6 Prozent und verbessert sich um 14,8 Prozent im Vergleich zum Anfangszustand der Methode. Die Forschungsfrage 12: „Wie hoch ist der abschließende Wert der Korrektklassifikationsrate der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung nach Einführung der Vorentscheidungen für die zweite Klassifizierungsstufe?“, ist hierdurch beantwortet.

3.12 Anwendung der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung auf deutsche Unfalldaten

Unter diesem Kapitel werden die Ergebnisse der angewendeten weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung bezogen auf die aktuellen deutschen Daten der Verkehrsunfälle der Jahre 2020 bis 2022 vorgestellt.

3.12.1 Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Verkehrsunfälle mit Getöteten der Jahre 2020 bis 2022

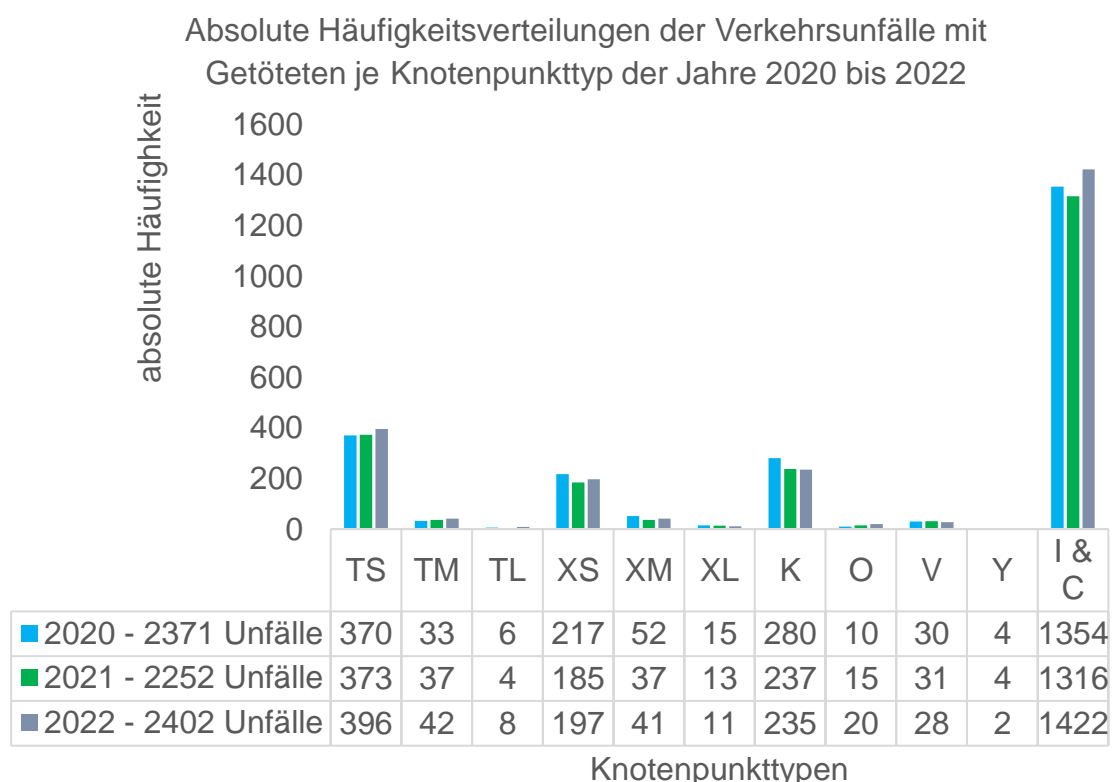


Bild 3-4: Absolute Häufigkeitsverteilungen der Verkehrsunfälle mit Getöteten je Knotenpunkttyp der Jahre 2020 bis 2022

Bild 3-4 beschreibt die absoluten Häufigkeiten der Verkehrsunfälle mit Getöteten je Knotenpunkttyp der Jahre 2020 bis 2022. Im Jahr 2021 gab es insgesamt einen leichten Rückgang der Anzahl der Verkehrsunfälle. Ein neuer Höchststand an Verkehrsunfällen mit Getöteten zeigt sich im Jahr 2022. Die meisten dieser Verkehrsunfälle ereigneten sich in der Klasse „kein Knotenpunkt“, folglich an geraden und kurvigen Straßen. Die kleinen Einmündungen sind der zweite Unfallschwerpunkt, gefolgt von den komplexen Knotenpunkten. Der vierte

Unfallsschwerpunkt sind die kleinen 4-Straßen-Kreuzungen. Die anderen Knotenpunkttypen verzeichnen mit Abstand weniger Verkehrsunfälle mit Getöteten.

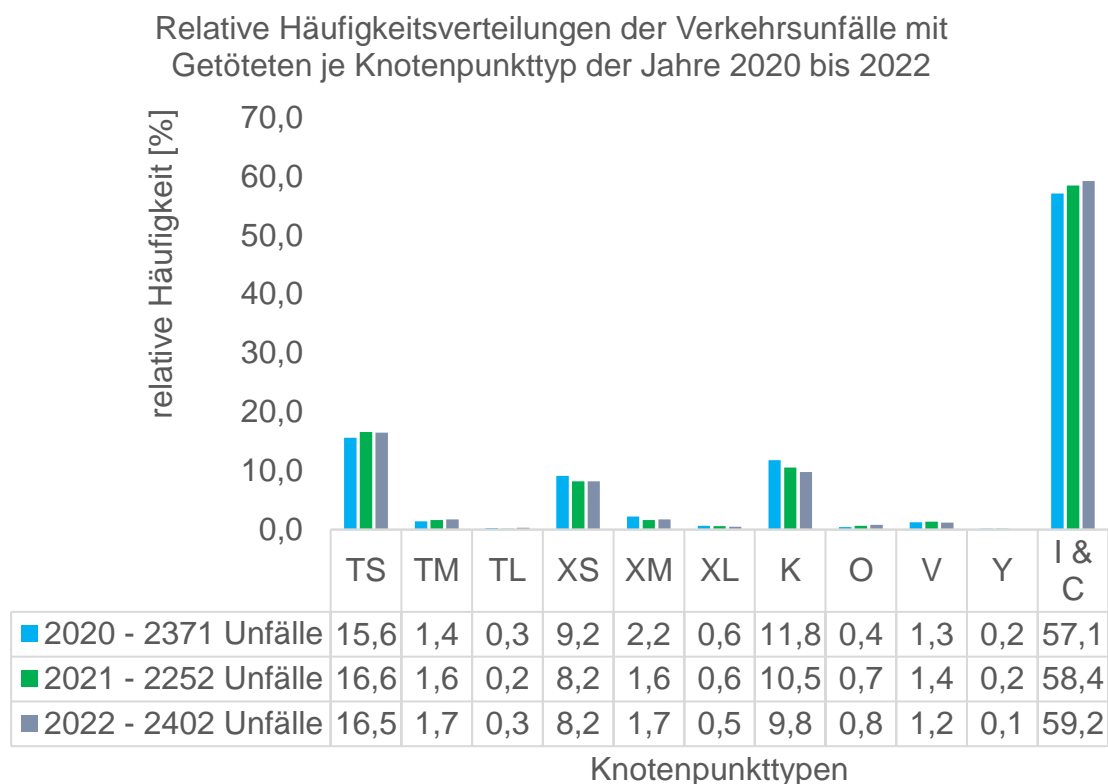


Bild 3-5: Relative Häufigkeitsverteilungen der Verkehrsunfälle mit Getöteten je Knotenpunkttyp der Jahre 2020 bis 2022

In Bild 3-5 werden die relativen Häufigkeiten der Verkehrsunfälle mit Getöteten je Knotenpunkttyp der Jahre 2020 bis 2022 dargestellt. Die Zahlen der Verkehrsunfälle sind um fast ein Prozent an kleinen Einmündungen und um mehr als zwei Prozent an geraden oder kurvigen Straßen gestiegen. An kleinen 4-Straßen-Kreuzungen sind Verkehrsunfälle um ein Prozent und an komplexen Kreuzungen um zwei Prozent gesunken. Die Anzahlen der Verkehrsunfälle an Kreisverkehren haben sich verdoppelt. Die Forschungsfrage 13: „Wie sind die Häufigkeitsverteilungen der Verkehrsunfälle mit Getöteten in den Jahren 2020 bis 2022 in Bezug auf die Knotenpunkttypen?“, kann mit Bild 3-4 auf Seite 67 und mit Bild 3-5 beantwortet werden.

3.12.2 Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020

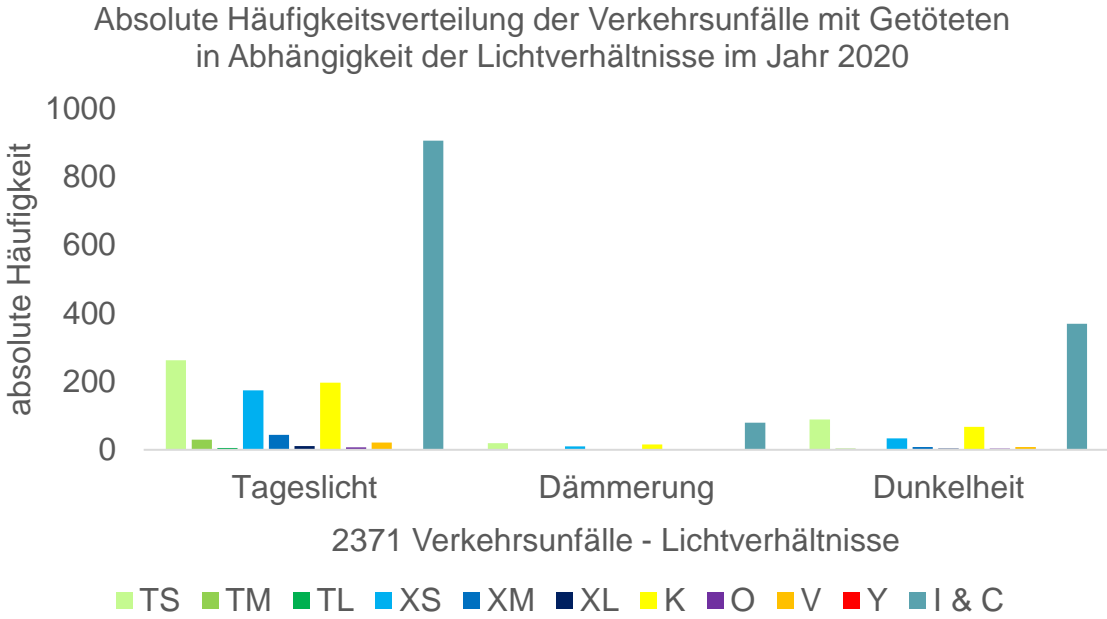


Bild 3-6: Absolute Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020

In Bild 3-6 wird die absolute Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Bezug auf die Lichtverhältnisse im Jahr 2020 gezeigt. Die meisten Verkehrsunfälle mit Getöteten geschehen bei Tageslicht.

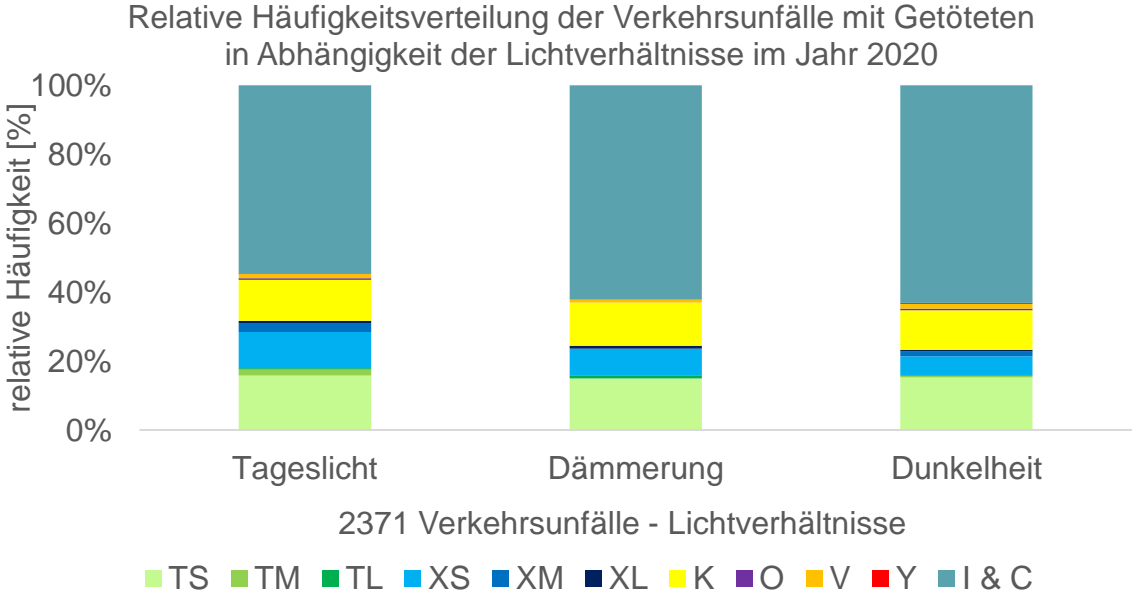


Bild 3-7: Relative Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020

Bild 3-7 auf Seite 69 stellt die relative Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020 dar. Auffällig ist, dass Verkehrsunfälle mit Getöteten der Klasse „kein Knotenpunkt“ bei Dämmerung und bei Dunkelheit gegenüber den Straßenverhältnissen bei Tageslicht deutlich zunehmen. Weiter hervorzuheben ist, dass die Anzahl der Verkehrsunfälle von Getöteten der kleinen 4-Straßen-Kreuzungen bei Tageslicht im Vergleich zur Dunkelheit fast 50 Prozent sinken. Die Werte der absoluten und relativen Häufigkeiten sind dem Anhang 12 auf Seite A12 zu entnehmen. Die Forschungsfrage 14: „Wie verhält sich die Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020?“, wird mit Bild 3-6 und Bild 3-7 auf Seite 69 beantwortet.

3.12.3 Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes

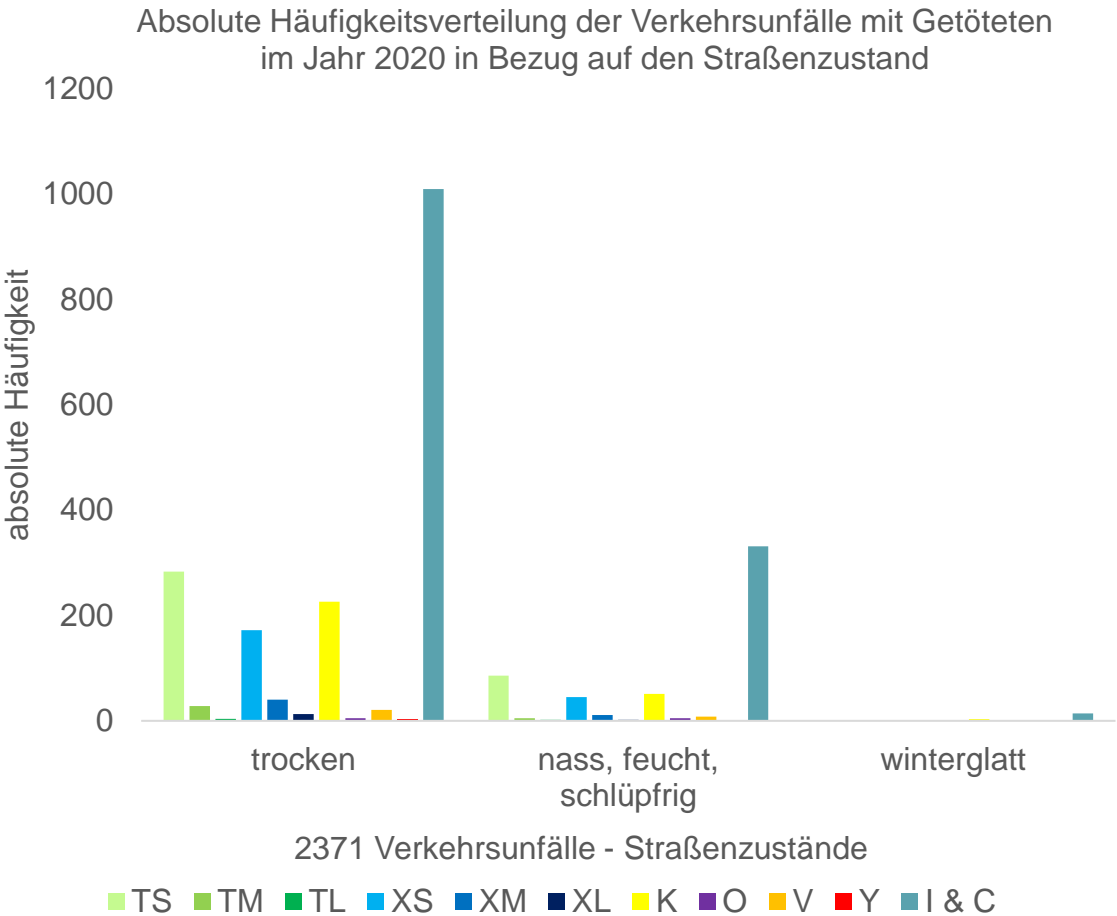


Bild 3-8: Absolute Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes

Bild 3-8 auf Seite 70 zeigt die absolute Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit der Straßenzustände. Die meisten Verkehrsunfälle mit Getöteten geschehen bei trockenen und die wenigsten bei winterglatten Straßenbedingungen.

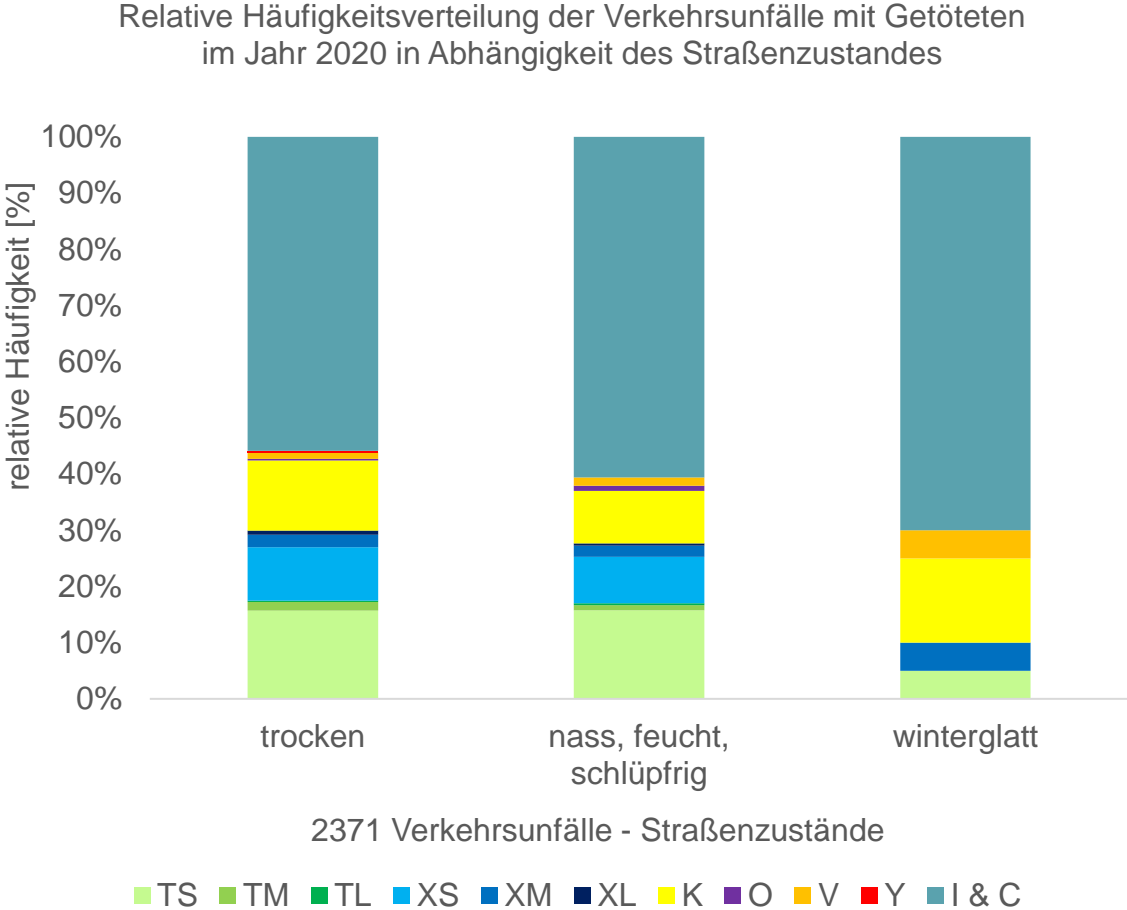


Bild 3-9: Relative Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes

Bild 3-9 beschreibt die relative Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Bezug auf den Straßenzustand. Bei der Interpretation der relativen Häufigkeitsverteilung ist zu beachten, dass die Gruppe bei winterglatten Straßenzuständen sehr klein ist (n = 20). Im Verhältnis gesehen steigt die Anzahl der Verkehrsunfälle mit Getöteten in der Klasse „kein Knotenpunkt“ von trockenen zu winterglatten Straßenbedingungen an. An den kleinen Einmündungen und an 4-Straßen-Kreuzungen werden die Verkehrsunfälle mit Getöteten bei winterglatten Straßenbedingungen im Vergleich zu den Verkehrsunfällen mit anderen Straßenbedingungen weniger. Im Anhang 13 auf Seite A13 sind die Werte der

absoluten und relativen Häufigkeiten der Verkehrsunfälle mit Getöteten beschrieben. Die Forschungsfrage 15: „Wie ist die Häufigkeitsverteilung der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Bezug auf den Straßenzustand?“, wird mit Bild 3-8 auf Seite 70 und Bild 3-9 auf Seite 71 beantwortet.

3.13 Konzept um alle niveaugleichen Knotenpunkte im deutschen Straßennetz zu klassifizieren

Im Folgenden wird ein Konzept beschrieben, um die Anzahl der niveaugleichen Knotenpunkte im gesamten deutschen Straßennetz zu klassifizieren. Deutschland wird mit Hilfe des UTM-Koordinatensystems in quadratische Kacheln mit 50 Metern Kantenlänge aufgeteilt. Dabei ist die zusätzliche Aufteilung von Deutschland in mehrere Meridianzonen zu berücksichtigen. Alle Kacheln, welche die Grenzlinie von Deutschland schneiden oder innerhalb dieser liegen, werden betrachtet. In dem linken Bild 3-10 ist die Anordnung der Kacheln schematisch dargestellt.

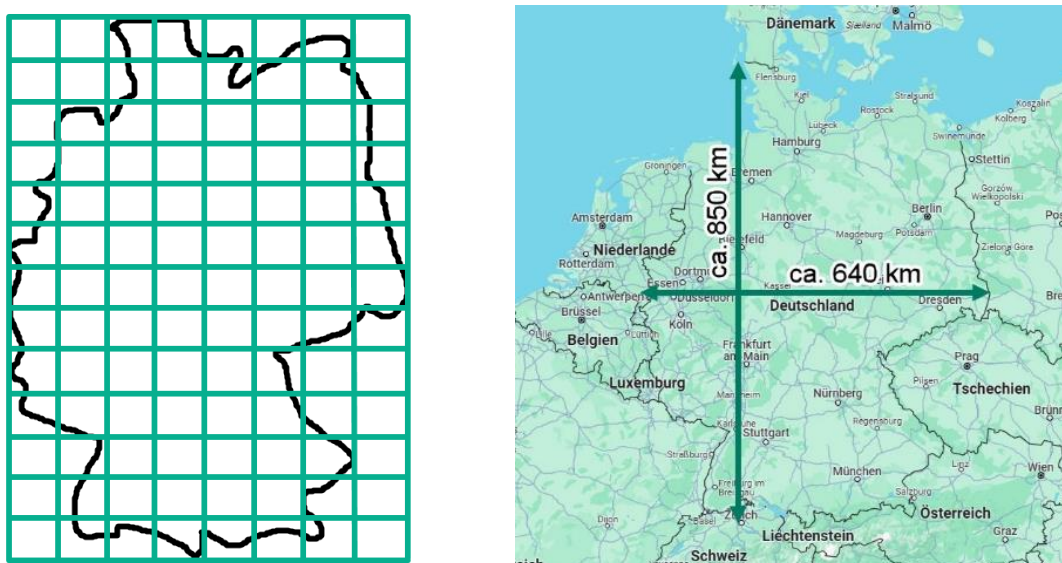


Bild 3-10: Skizze mit Anordnung der Kacheln und Abmaße von Deutschland (Deutschlandkarte nach [21] GOOGLE MAPS)

Das rechte Bild 3-10 zeigt die Abmaße von Deutschland. Die breiteste horizontale Stelle misst ca. 640 Kilometer und die längste vertikale ca. 850 Kilometer. Daraus ergibt sich ein aufgespanntes Rechteck, das 217,6 Millionen quadratische Kacheln mit jeweils einer Kantenlänge von 50 Metern beinhaltet.

Für die Berechnung der Werte einer Kachel werden alle geometrischen Daten, welche die Kachel schneiden oder in dieser liegen, aus der OpenStreetMap-Datenbank importiert. Anschließend werden die Koordinaten der Punkte bestimmt, die ein Teil von mindestens zwei verschiedenen Straßen-Geometrien sind. Diese Koordinaten werden in einer separaten Datei erfasst. Nach der Berechnung der Werte aller Kacheln, sind alle möglichen Koordinaten, die Knotenpunkte oder ein Teil eines Knotenpunktes sein können, gelistet. Hierbei ist zu beachten, dass damit auch eine Verbindung zwischen zwei Straßen-Segmenten einer Straßen-Geometrie erfasst wird. Mit dem erläuterten Konzept wird die Forschungsfrage 16: „Kann ein Konzept entwickelt werden, um die Koordinaten aller möglichen Knotenpunkte im deutschen Straßennetz zu detektieren?“, positiv beantwortet.

4 Diskussion

Der größte Mehrwert dieser Arbeit besteht in den stark verbesserten Kennzahlen der weiterentwickelten Methode zur automatisierten Klassifizierung von niveaugleichen Knotenpunkten. Die positive Erkennungsrate ist um 31,0 Prozent auf 88,1 Prozent und die negative Erkennungsrate um 9,4 Prozent auf 98,7 Prozent gestiegen. Die Korrekturklassifikationsrate hat sich um 14,8 Prozent auf 97,6 Prozent verbessert. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit ist es möglich, neue Verkehrsunfallanalysen in Bezug auf Knotenpunkttypen durchzuführen und zusätzliche Erkenntnisse zu gewinnen, die für die Verkehrsplanung hilfreich sind. Die Resultate daraus können zu einer Verringerung der Verkehrsunfälle mit Personenschaden führen.

4.1 Grenzen der Klassifizierung

In diesem Kapitel werden die Grenzen der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung aufgezeigt, welche die Klassifizierung erschweren oder falsche Entscheidungen verursachen können.

Falsch codierte geometrische Daten der OpenStreetMap-Datenbank können eine Fehlerquelle sein. Dazu zählen Straßen mit fehlerhaften oder fehlenden Eigenschaften. Eine vorherige Analyse der OpenStreetMap-Datenbank würde diese Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität prüfen.

Es bestehen Unterschiede zwischen dem realen Luftbild und der Umsetzung mit den geometrischen Daten in der OpenStreetMap Datenbank. Oft sind bauliche Fahrbahntrennungen in den geometrischen Daten der OpenStreetMap-Datenbank, meist Verkehrsinseln in Knotenpunktbereichen, nicht umgesetzt. Die geteilte Straße mit der Verkehrsinsel wird in diesem Fall nur als eine Linie dargestellt. Weiterhin sind tangential aus- oder einfädelnde Fahrbahnen in den geometrischen Daten nicht mit flachem Winkel, sondern mit deutlich größerem Winkel realisiert. Aus- und Einfädelungsspuren können komplett vernachlässigt worden sein. In den geometrischen Daten können ganze Straßen fehlen oder auch mehrfach fehlerhaft vorkommen. Auch hier würde eine vorgelagerte Analyse der OpenStreetMap-Datenbank die Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität untersuchen.

Bei der Klassifizierung von Kreisverkehren können Fehlentscheidungen auftreten. Beispielhaft zeigen die geometrischen Daten eine Einmündung und einen in zehn Metern anschließenden Kreisverkehr. Die Koordinate, die auf der Einmündung liegt, wird fehlerhaft als Kreisverkehr klassifiziert. In diesem Fall wäre die Einmündung aber stattdessen als komplexer Knotenpunkt zu klassifizieren. Eine mögliche Lösung besteht darin, zu prüfen ob der Referenzpunkt Teil einer Straßen-Geometrie mit der Eigenschaft „roundabout“ ist. Ist dies nicht der Fall, dann sollte der unbekannte Knotenpunkt in der zweiten Klassifizierungsstufe untersucht und klassifiziert werden.

Bei der Optimierung „Verbund“ gibt es die Besonderheit, dass innerhalb des betrachteten quadratischen Suchfeldes nicht verbundene geometrische Daten im Rasterbild dennoch dargestellt werden und auf die Berechnung Auswirkungen haben. Dazu zählen alle geometrischen Daten, die sich innerhalb des nicht dargestellten Kreises, der durch die vier Eckpunkte des gewählten quadratischen Suchfeldes verläuft, verbunden sind. Das Rasterbild sollte hier dementsprechend bearbeitet und die nicht im betrachteten quadratischen Suchfeld liegenden Punkte gelöscht werden.

Liegt die zu betrachtende Koordinate in einem Bereich, in dem sich mehrere Straßen in unterschiedlichen Ebenen kreuzen, dann ist die korrekte Zuordnung der Straße zur zugehörigen Ebene nicht möglich. Es wird die nächstgelegene Straßen-Geometrie ausgewählt und klassifiziert. Durch Einführung einer neuen Eigenschaft "Ebene des Unfallortes" der einzulesenden Daten des Verkehrsunfalls würde dieses Problem gelöst werden.

Bei zwei nicht verbundenen parallelen Straßen-Geometrien besitzt eine Straßen-Geometrie eine Einmündung. Liegt die Koordinate auf der Straßen-Geometrie ohne Einmündung, dann klassifiziert die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung die Einmündung auf der anderen Straßen-Geometrie als Referenzpunkt. Die Straßen-Geometrie ohne Einmündung wird durch die Optimierung „Verbund“ gelöscht. In Bezug auf die Verkehrsunfallanalyse ist dieses Ergebnis fehlerhaft. Die Programmierung sollte dahingehend angepasst werden, dass zuerst die nächstgelegene Straßen-Geometrie bestimmt wird. Anschließend wird der nächstgelegene Referenzpunkt gesucht, der auf dieser Straßen-Geometrie liegt. Im aufgezeigten Beispiel gäbe es keinen Referenzpunkt, sodass die Straßen-

Geometrie mit der Einmündung gelöscht würde. Das Ergebnis der Klassifizierung wäre entsprechend eine gerade oder kurvige Straße.

4.2 Ausblick

Auch die beschriebene weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung von Knotenpunkten weist Grenzen auf. Im Laufe der Arbeit sind nachfolgende Konzeptionen entstanden, um den aktuellen Stand der Methode zur Klassifizierung weiter zu verbessern.

Der Aufbau des Datensatzes mit 10000 manuell klassifizierten Knotenpunkten erfolgte mit Hilfe eines bereitgestellten Programms. Dieses könnte verbessert werden, um nicht eindeutige Knotenpunkte präziser zu klassifizieren. Daher wird empfohlen das Programm mit dem jeweiligen realen Luftbild des zu klassifizierenden Knotenpunktes zu erweitern.

Großes Verbesserungspotential liegt auch in der Erweiterung der Knotenpunkttypen. Die komplexen Knotenpunkte können in nachfolgende Knotenpunkttypen aufgeteilt werden: kleine, mittlere und große komplexe Einmündungen, äquivalent dazu die 4-Straßen-Kreuzungen und komplexe Fädelungspunkte. Infolgedessen wird der Maximum-Likelihood-Klassifikator genauere Entscheidungen treffen, denn die Kennwerte für den jeweiligen komplexen Knotenpunkt sind aussagekräftiger.

Zukünftig sind weitere parameterbasierte Optimierungen und Merkmale zu entwickeln. Aus der Arbeit ergeben sich folgende offene Forschungsfragen:

- Kann das Programm zur manuellen Klassifizierung von Knotenpunkten mit einem realen Luftbild erweitert werden?
- Können zusätzliche Knotenpunkttypen erstellt werden?
- Sind erneute parameterbasierte Optimierungen zur Verbesserung der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung möglich?
- Welche weiteren Merkmale können eingeführt werden?

Die hier aufgezeigten Forschungsfragen dienen der zusätzlichen Verbesserung der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung, sie können zur künftigen Bearbeitung dieser genutzt werden.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit sind detaillierte Verkehrsunfallanalysen unter Einbeziehung der Knotenpunkttypen realisierbar. Durch die Anwendung des Konzeptes und der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung können deutschlandweit alle niveaugleichen Knotenpunkte klassifiziert werden. Mit diesem Wissen sind Aussagen über Charakteristika von Unfallorten und weitreichende Analysen möglich. Daraufhin können komplizierte Verkehrsbereiche mit statistisch überhöhtem Unfallaufkommen lokalisiert und untersucht werden. Die daraus hergeleiteten Handlungsempfehlungen zu Änderungen fahrzeugspezifischer Maßnahmen und zu Anpassungen der Infrastruktur können die Verkehrssicherheit aktiv verbessern und die Verkehrsunfälle mit Personenschaden senken. Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag für das Projekt „Vision Zero“ des Bundes [2] BMVI.

5 Zusammenfassung

Motivation: Verkehrsunfälle werden anhand erhobener Eigenschaften analysiert, um Verbesserungsmaßnahmen zur Reduzierung der Verkehrsunfälle abzuleiten. Eigenschaften über den Knotenpunkttyp eines Verkehrsunfalls werden bislang nicht erfasst. Die Literaturstudie hat gezeigt, dass es eine Methode zur automatisierten Klassifizierung von niveaugleichen Knotenpunkttypen gibt. Diese ist jedoch eingeschränkt nutzbar, da sie jeweils nur auf ein Bundesland anwendbar ist, die Erkennungsraten niedrig sind und die Anzahl an Knotenpunkttypen limitiert ist. Daher wurde die Methode zur automatisierten Klassifizierung von niveaugleichen Knotenpunkten im Straßennetz in dieser Arbeit weiterentwickelt, um die Erkennungsraten und die Anzahl der Knotenpunkttypen zu erhöhen.

Methode: Zu Beginn wurden deutschlandweite OpenStreetMap-Kartendaten in eine lokale Datenbank eingepflegt. Nachfolgend wurden neue Knotenpunkttypen eingeführt und der Trainings- und Testdatensatz vergrößert. Anschließend wurden Optimierungen entwickelt und neue Merkmale hergeleitet. Der Maximum-Likelihood-Klassifikator wurde angepasst, neue Vorentscheidungen wurden erarbeitet und die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung wurde auf deutschlandweite Unfallorte angewendet. Zum Schluss wurde ein Konzept erstellt um alle niveaugleichen Knotenpunkte im deutschen Straßennetz zu identifizieren.

Ergebnisse: Die weiterentwickelte Methode zur Klassifizierung kann auf die gesamte Region Deutschland angewendet werden. Neue Knotenpunkttypen sind die mittlere und große Einmündung, die mittlere 4-Straßen-Kreuzung, Fädelungspunkte und die Fahrbahntrennung. Der Trainingsdatensatz umfasst 7000 und der Testdatensatz 3000 manuell klassifizierte Knotenpunkte. Eine Unter- oder Überanpassung der Datensätze ist ausgeschlossen. Die positive Erkennungsrate ist um 31,0 Prozent auf 88,1 Prozent gestiegen und die negative Erkennungsrate hat sich um 9,4 Prozent auf 98,7 Prozent verbessert. Die Korrektklassifikationsrate hat sich um 14,8 Prozent auf 97,6 Prozent erhöht. Mit dem erstellten Konzept können alle Koordinaten möglicher Knotenpunkte gelistet werden.

Schlussfolgerung: Auf Grund der Ergebnisse dieser Arbeit sind umfangreiche Verkehrsunfallanalysen durchführbar. Unter Anwendung des Konzeptes zur

Bestimmung aller Koordinaten möglicher Knotenpunkte und der weiterentwickelten Methode zur Klassifizierung können alle niveaugleichen Knotenpunkte innerhalb Deutschlands klassifiziert werden. Damit sind Rückschlüsse auf spezifische Eigenschaften von Unfallorten möglich und es können umfassende Analysen durchgeführt werden, um kritische Verkehrsbereiche zu identifizieren. Damit besteht die Möglichkeit Empfehlungen zu Änderungen fahrzeugspezifischer Maßnahmen und zu Anpassungen der Infrastruktur abzuleiten, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen und die Anzahl von Verkehrsunfällen mit Personenschaden zu verringern.

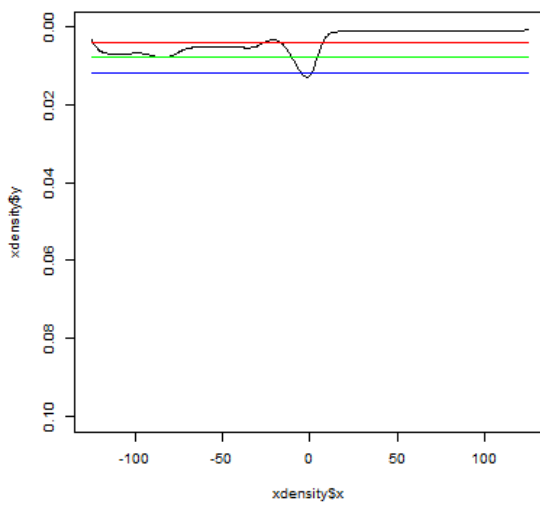
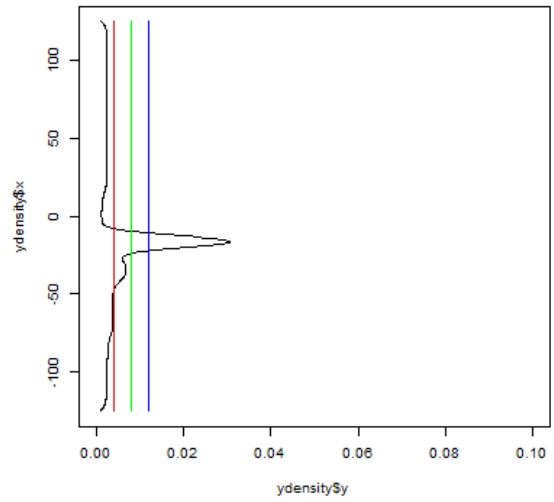
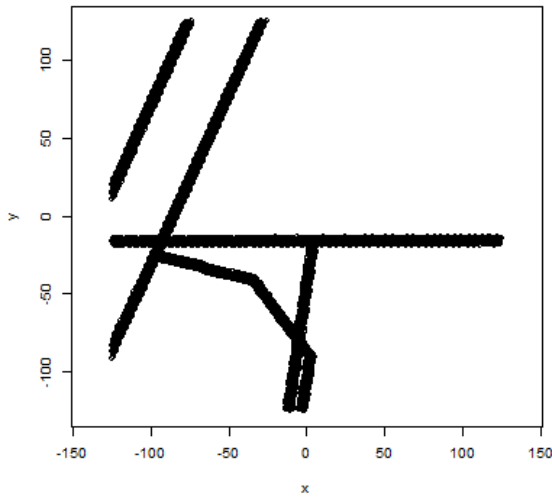
Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS).
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publicationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-aktuell-pdf-2080110.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff am 07.07.2023. 04/2023.
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI). https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/broschuere-verkehrssicherheitsprogramm-2021-bis-2030.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff am 07.07.2023. 06/2021.
- [3] STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (UNFALLATLAS).
https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/transport_verkehr/unfallatlas/DSB_Unfallatlas.pdf. Zugriff am 07.07.2023.
- [4] STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (UNFALLATLAS).
<https://unfallatlas.statistikportal.de>. Zugriff am 07.07.2023.
- [5] PFITZNER, PASCAL: Erstellung eines Algorithmus zur automatisierten Erkennung des Typs einer Kreuzung. Hochschule für Technik und Wirtschaft. Dresden. Studienarbeit. 03/2017.
- [6] GOOGLE MAPS.
<https://www.google.de/maps/@50.7149774,12.5004543,105m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4?entry=ttu>. Zugriff am 07.07.2023.
- [7] BREITLAUCH, PASCAL: Automatisierte Infrastrukturerkennung. Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI. Dresden. Bericht. 02/2022. unveröffentlicht.
- [8] RICHARDS, JOHN ALAN: Remote Sensing Digital Image Analysis. 6th ed. 2022. Cham (CH). Springer. 2022.
- [9] BREITLAUCH, PASCAL: Infrastrukturerkennung. Quellcode. Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI. Dresden. Zugriff am 07.07.2023. unveröffentlicht.

- [10] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN: Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS). Ausgabe 1988. Köln. FGSV. 1988.
- [11] MENSEBACH, WOLFGANG: Strassenverkehrsplanung, Strassenverkehrstechnik. 4., neu bearbeitete Auflage. Düsseldorf. Werner. 2004.
- [12] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), 202. Ausgabe 2008. Köln. FGSV. 2008.
- [13] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), 201. Ausgabe 2012. Köln. FGSV. 2012.
- [14] BRACHER, ANDREAS; BÖSL, BERNHARD: Strassenplanung. 9. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Köln. Bundesanzeiger. 2017.
- [15] GEOFABRIK GMBH. Karlsruhe. <https://www.geofabrik.de>. Zugriff am 07.07.2023.
- [16] GEOFABRIK GMBH. Karlsruhe. <https://download.geofabrik.de>. Zugriff am 07.07.2023.
- [17] OPENSTREETMAP GEODATEN.
<https://www.openstreetmap.org/#map=19/50.71487/12.50033&layers=D>. Zugriff am 07.07.2023.
- [18] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS). Wiesbaden.
<https://www.destatis.de>. Zugriff am 07.07.2023.
- [19] MUELLER, JOHN PAUL; MASSARON, LUCA: Maschinelles Lernen mit Python und R für Dummies. Weinheim. Wiley-VCH. 2017.
- [20] BRUCE, PETER; BRUCE, ANDREW; GEDECK, PETER: Praktische Statistik für Data Scientists. 1. Auflage. Heidelberg. O'Reilly. 2021.
- [21] GOOGLE MAPS.
<https://www.google.de/maps/@51.3228495,9.0022611,6z?entry=ttu>. Zugriff am 07.07.2023.

Anhang

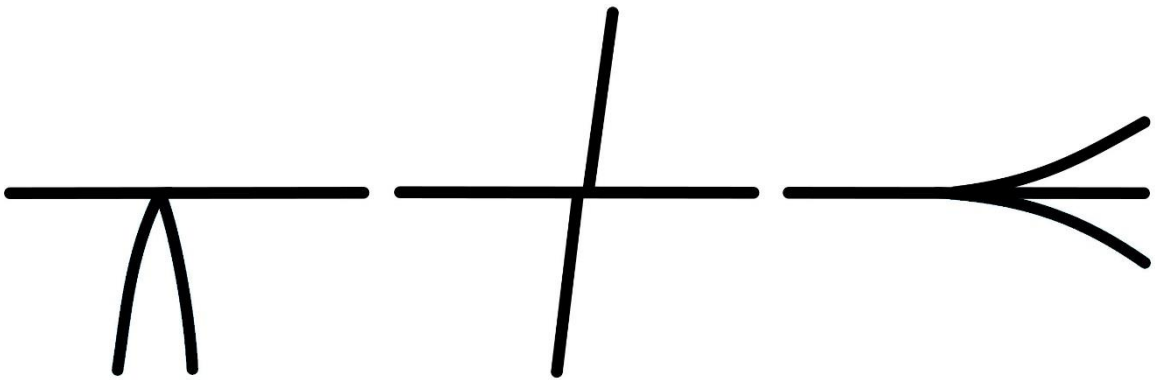
Anhang 1: Dokumentation der ersten Klassifizierungsstufe



Count of independent roads: 7
 Number of Peaks in y: 1 (85)
 Number of Peaks in x: 2 (185, 42)
 Count of values != 0 in y: 512

 accident_DA is detected as intersection

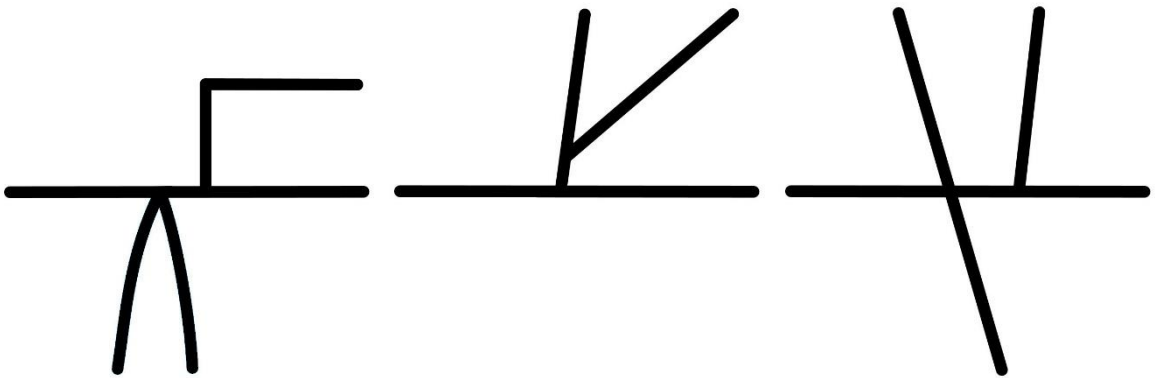
Anhang 3: Beispiele klassifizierbarer Knotenpunkttypen



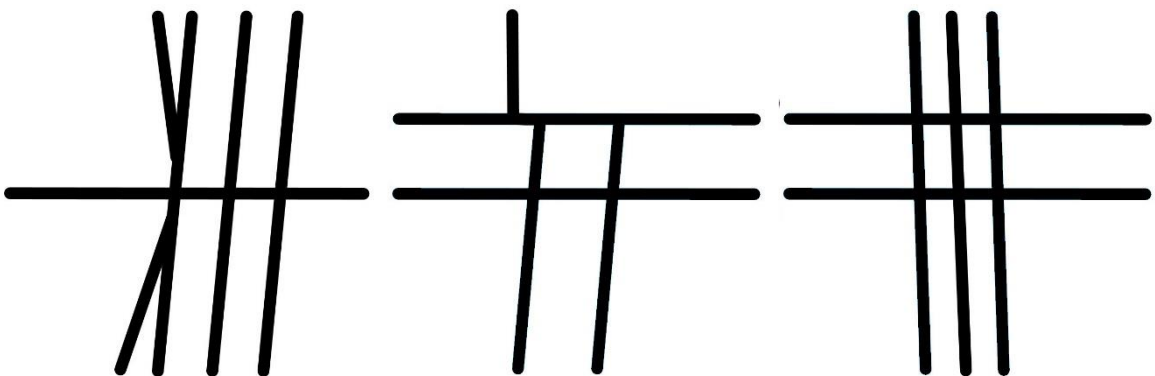
mittlere Einmündung

kleine 4-Straßen-Kreuzung

Fädelpunkt



drei komplexe Knotenpunkte



drei komplexe Knotenpunkte

Anhang 4: Ansicht des Programms zur manuellen Klassifizierung der Knotenpunkte

OSM-Kartenansicht

komplexe Kreuzung

Eingabebereich

1-Klassifizierung

- TS-Kreuzung (1)
- TH-Kreuzung (1+1)
- TL-Kreuzung (1+1+1)
- XS-Kreuzung (2)
- XM-Kreuzung (2+2)
- XI-Kreuzung (2+2+2)
- komplexe Kreuzung (3)
- V-Fädung (4)
- V-Fahrbahnentmung (4+4)
- ungeeignet (5)

11:18:49: "case_accident_DA_intersection.png" erfolgreich geöffnet, 1300x900

Anhang 5: Übersicht der absoluten und relativen Häufigkeit des Datensatzes

Knoten- punkttyp	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	Zeilensumme
	Datensatz										
gesamter Datensatz											
absolute Häufigkeit	3413	637	100	2001	499	208	2700	375	49	18	10000
relative Häufigkeit [%]	34,1	6,4	1,0	20,0	5,0	2,1	27,0	3,8	0,5	0,2	100
Trainingsdatensatz											
absolute Häufigkeit	2393	442	70	1401	349	144	1890	265	34	12	7000
relative Häufigkeit [%]	34,2	6,3	1,0	20,0	5,0	2,1	27,0	3,8	0,5	0,2	100
Testdatensatz											
absolute Häufigkeit	1020	195	30	600	150	64	810	110	15	6	3000
relative Häufigkeit [%]	34,0	6,5	1,0	20,0	5,0	2,1	27,0	3,7	0,5	0,2	100

Anhang 6: Konfusionsmatrix nach Anpassung der Definition des quadratischen Suchfeldes

Soll \ Ist	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahnrennung	I & C - kein Knotenpunkt	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
TS	937	13	0	0	0	0	163	2	0	0	1115
TM	21	160	17	0	0	0	15	2	0	0	215
TL	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
XS	0	0	0	510	0	0	73	0	0	0	583
XM	0	0	0	36	140	11	81	0	0	0	268
XL	0	0	0	1	2	53	35	0	0	0	91
K	40	22	10	52	8	0	434	9	2	0	577
V	22	0	0	1	0	0	9	97	8	0	137
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5
I & C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6
SPS	1020	195	30	600	150	64	810	110	15	6	3000

SPS – Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)

Anhang 7: Kennzahlen nach Anpassung der Definition des quadratischen Suchfeldes

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
kleine Einmündung	91,9	84,0	95,6
mittlere Einmündung	82,1	74,4	98,7
große Einmündung	10,0	100,0	99,1
kleine 4-Straßen-Kreuzung	85,0	87,5	96,3
mittlere 4-Straßen-Kreuzung	93,3	52,2	99,6
große 4-Straßen-Kreuzung	82,8	58,2	99,6
komplexer Knotenpunkt	53,6	75,2	84,5
Fädelpunkt	88,2	70,8	99,5
Fahrbahntrennung	33,3	100,0	99,7
kein Knotenpunkt	100,0	100,0	100,0

positive Erkennungsrate = 78,2 % (+0,3 % zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

negative Erkennungsrate = 97,6 % (+0,1 % zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

Korrektklassifikationsrate = 95,6 % (+0,0 % zu Tabelle 3-10 auf Seite 59)

Anhang 8: Konfusionsmatrix nach Anpassung der Definition der Linienbreite mit 10 Pixel

Soll \ Ist	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
TS	955	4	0	0	0	0	146	6	0	0	1111
TM	13	167	9	0	0	0	24	0	0	0	213
TL	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
XS	0	0	0	507	0	0	72	0	0	0	579
XM	0	0	0	24	140	13	77	0	0	0	254
XL	0	0	0	0	0	50	33	0	0	0	83
K	38	23	18	67	10	1	454	9	2	0	622
V	12	0	0	1	0	0	4	95	9	0	121
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4
I & C	2	1	0	1	0	0	0	0	0	6	10
SPS	1020	195	30	600	150	64	810	110	15	6	3000

SPS – Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)

Anhang 9: Kennzahlen nach Anpassung der Definition der Linienbreite mit 10 Pixel

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
kleine Einmündung	93,6	86,0	96,6
mittlere Einmündung	85,6	78,4	99,0
große Einmündung	10,0	100,0	99,1
kleine 4-Straßen-Kreuzung	84,5	87,6	96,2
mittlere 4-Straßen-Kreuzung	93,3	55,1	99,6
große 4-Straßen-Kreuzung	78,1	60,2	99,5
komplexer Knotenpunkt	56,0	73,0	85,0
Fädelpunkt	86,4	78,5	99,5
Fahrbahntrennung	26,7	100,0	99,6
kein Knotenpunkt	100,0	60,0	100,0

positive Erkennungsrate = 79,4 % (+1,2 % zu Anhang 7 auf Seite A7)

negative Erkennungsrate = 97,7 % (+0,1 % zu Anhang 7 auf Seite A7)

Korrektklassifikationsrate = 95,9 % (+0,3 % zu Anhang 7 auf Seite A7)

Anhang 10: Konfusionsmatrix nach Anpassung der Definition der Linienbreite mit 5 Pixel

Soll \ Ist	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	Zeilensumme (Summe der klassifizierten Daten)
TS	943	1	0	0	0	0	122	1	0	0	1067
TM	20	174	13	0	0	0	39	0	0	0	246
TL	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
XS	0	0	0	531	0	0	70	0	0	0	601
XM	0	0	0	18	136	8	73	0	0	0	235
XL	0	0	0	0	0	50	30	0	0	0	80
K	44	20	14	50	14	6	468	11	3	0	630
V	13	0	0	1	0	0	8	98	8	0	128
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4
I & C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6
SPS	1020	195	30	600	150	64	810	110	15	6	3000

SPS – Spaltensumme (Summe der Referenzdaten)

Anhang 11: Kennzahlen nach Anpassung der Definition der Linienbreite mit 5 Pixel

Knotenpunkttyp \ Kennzahl	Richtig-positiv-Rate [%]	positiver Vorhersagewert [%]	negativer Vorhersagewert [%]
kleine Einmündung	92,5	88,4	96,0
mittlere Einmündung	89,2	70,7	99,2
große Einmündung	10,0	100,0	99,1
kleine 4-Straßen-Kreuzung	88,5	88,4	97,1
mittlere 4-Straßen-Kreuzung	90,7	57,9	99,5
große 4-Straßen-Kreuzung	78,1	62,5	99,5
komplexer Knotenpunkt	57,8	74,3	85,6
Fädelpunkt	89,1	76,6	99,6
Fahrbahntrennung	26,7	100,0	99,6
kein Knotenpunkt	100,0	100,0	100,0

positive Erkennungsrate = 80,4 % (+2,2 % zu Anhang 7 auf Seite A7)

negative Erkennungsrate = 97,6 % (+0,2 % zu Anhang 7 auf Seite A7)

Korrektklassifikationsrate = 96,1 % (+0,5 % zu Anhang 7 auf Seite A7)

Anhang 12: Übersicht der absoluten und relativen Häufigkeiten der Verkehrsunfälle mit Getöteten in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse im Jahr 2020

Knotenpunkttyp	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	O - Kreisverkehr	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	Zeilensumme
Tageslicht												
absolute Häufigkeit	262	30	5	174	44	11	197	7	21	2	906	1659
relative Häufigkeit [%]	15,8	1,8	0,3	10,5	2,7	0,7	11,9	0,4	1,3	0,1	54,6	100
Dämmerung												
absolute Häufigkeit	19	0	1	10	0	1	16	0	1	0	79	127
relative Häufigkeit [%]	15,0	0,0	0,8	7,9	0,0	0,8	12,6	0,0	0,8	0,0	62,2	100
Dunkelheit												
absolute Häufigkeit	89	3	0	33	8	3	67	3	8	2	369	585
relative Häufigkeit [%]	15,2	0,5	0,0	5,6	1,4	0,5	11,5	0,5	1,4	0,3	63,1	100

Anhang 13: Übersicht der absoluten und relativen Häufigkeiten der Verkehrsunfälle mit Getöteten im Jahr 2020 in Abhängigkeit des Straßenzustandes

Knotenpunkttyp	Straßenzustand											Zeilensumme
	TS - kleine Einmündung	TM - mittlere Einmündung	TL - große Einmündung	XS - kleine 4-Straßen-Kreuzung	XM - mittlere 4-Straßen-Kreuzung	XL - große 4-Straßen-Kreuzung	K - komplexer Knotenpunkt	O - Kreisverkehr	V - Fädelungspunkt	Y - Fahrbahntrennung	I & C - kein Knotenpunkt	
trocken												
absolute Häufigkeit	283	28	4	172	40	13	226	5	21	4	1009	1805
relative Häufigkeit [%]	15,7	1,6	0,2	9,5	2,2	0,7	12,5	0,3	1,2	0,2	55,9	100
nass, feucht, schlüfrig												
absolute Häufigkeit	86	5	2	45	11	2	51	5	8	0	331	546
relative Häufigkeit [%]	15,8	0,9	0,4	8,2	2,0	0,4	9,3	0,9	1,5	0,0	60,6	100
winterglatt												
absolute Häufigkeit	1	0	0	0	1	0	3	0	1	0	14	20
relative Häufigkeit [%]	5,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	15,0	0,0	5,0	0,0	70,0	100