

RWTH Aachen University  
Fakultät für Maschinenwesen

Institut für Kraftfahrzeuge  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

**Masterarbeit**

**Entwicklung eines Werkzeugs zur Erstellung  
logischer und variierbarer  
virtueller Strecken für die Absicherung von  
automatisierten Fahrfunktionen**

Diese Arbeit wurde vorgelegt am Institut für Kraftfahrzeuge  
von:

Herrn B. Sc. Fabian Russ, Matr.-Nr.: 331822

betreut von:

M. Sc. Daniel Becker

Erstprüfer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

Zweitprüfer:

Dr.-Ing. Adrian Zlocki

Aachen, Juni 2019

Inhalt und Ergebnisse dieser Arbeit sind ausschließlich zum internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen bei der RWTH Aachen University. Ohne ausdrückliche Genehmigung des betreuenden Lehrstuhls ist es nicht gestattet, diese Arbeit oder Teile daraus an Dritte weiterzugeben.



Datum: 05.11.2018

Zeichen: 18kk0006

**Masterarbeit**  
**für Herrn Fabian Russ, B.Sc., Matr.-Nr.: 33 18 22**  
**„Entwicklung eines Werkzeugs zur Erstellung logischer und variierbarer  
virtueller Strecken für die Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen“**

Zur Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen ist die Simulation neben der Teststrecke und dem Realverkehr ein notwendiges Werkzeug. Insbesondere ist dies darin begründet, dass die erforderlichen Testkilometer in der Realität nicht geleistet werden können. Die Simulation ist hochskalierbar und es können Tests reproduzierbar und deterministisch durchgeführt werden. Außerdem lassen sich Szenarien in der Simulation gezielt erstellen und abbilden, während im Realverkehr nach entsprechenden Szenarien „gesucht“ werden muss. Dadurch sind viele eingefahrene Realtestkilometer für die Absicherung nicht relevant und möglicherweise wird das Verkehrsszenario nie angetroffen. Aus diesem Grund kann die Simulation effizient eingesetzt werden und bildet bei entsprechender Umsetzung einen Großteil des Testraums ab. Basis der Simulation sind dabei Modelle die Strecke, Verkehr, Fahrzeug und Umwelt abbilden. Dabei müssen die Modelle einerseits realistisch das modellierte Subjekt abbilden, andererseits aber an den entsprechenden Stellen frei konfigurierbar sein, sodass die Szenarien nach den gegebenen Anforderungen erstellt werden können.

Eine Herausforderung dabei stellt die Streckengenerierung dar. Dazu soll in dieser Arbeit ein Konzept entwickelt und anschließend exemplarisch umgesetzt werden, mit dem es möglich ist, analog zum Begriff der logischen Szenarien, logische Strecken zu erstellen. Dazu sollen relevante Streckenelemente zunächst untersucht und über ein Modell und einen Parameterbaum definiert werden. Im Anschluss soll ein Generator implementiert werden, der die Modelle unter gegebenen Parametern in Simulationskarten überführt (OpenDRIVE). Die Arbeit gliedert sich wie folgt:

- Literaturrecherche zum Stand der Technik,
- Konzeptentwicklung für *logische* Streckenszenarien,
- Identifikation der relevanten Streckenelemente, Modell- und Parameterdefinition,
- Implementierung des Generators,
- Dokumentation der Arbeit.

Verteiler:

Kandidat 1  
Assistent (DBE) 1  
Sekretariat 1  
Bereichsleiter 1  
Intern x  
Extern (Firma)

Die Arbeit bleibt Eigentum des Instituts.  
Sie ist in einem gehefteten Leseexemplar und in digitaler Form mit Entlastungszettel im Geschäftszimmer des Instituts abzugeben. Originalprotokolle von Versuchen sind beizufügen.

Wenn die Note für einen Meldetermin benötigt wird ist zu beachten, dass Durchsicht und Beurteilung nur gewährleistet sind, wenn die Arbeit mindestens drei Wochen vor dem Termin abgegeben wird.

400545

V2.0

**Inhalt**

1	Einleitung und Motivation.....	6
2	Grundlagen und Stand der Technik .....	8
2.1	Virtuelle Verkehrssimulation .....	8
2.1.1	Detaillierungsgrad von Verkehrssimulationen.....	9
2.1.2	Teilmodelle der Verkehrssimulation.....	11
2.2	Mathematische Grundlagen.....	13
2.2.1	Berechnungen der geometrischen Elemente.....	13
2.2.2	Das Krümmungsband.....	20
2.3	Entwurf und Gestaltung realer Straßen.....	21
2.3.1	Vorplanung (Linienentwurf) .....	22
2.3.2	Vorentwurf (Lageplan).....	24
2.3.2.1	Aufteilung in Trassierungselemente .....	24
2.3.2.1.1	Trassierungselemente .....	24
2.3.2.1.2	Tangentenmethode .....	26
2.3.2.1.3	Grundkreismethode .....	27
2.3.2.2	Berechnung der Baulänge.....	28
2.3.3	Detailentwurf .....	29
2.3.3.1	Aufstellen des Höhenplans.....	30
2.3.3.2	Bestimmung des Regelquerschnittes .....	32
2.3.3.3	Querneigung und Verwindung.....	32
2.4	Abstraktionsebenen von Szenarien .....	34
2.5	OpenDRIVE.....	36
3	Forschungsbedarf und Forschungsansatz .....	41
3.1	Analyse aktueller Systeme und Ableiten der Forschungsbedarfs.....	41
3.2	Analyse zum Aufbau eines realen Straßennetzes.....	42
3.3	Konkretisierung des Forschungsansatzes .....	48
4	Konzept zur Erstellung logischer und variierbarer virtueller Straßen .....	49
4.1	Referenzlinienebene .....	49

4.1.1	Erstellung von Segmenten .....	49
4.1.2	Erstellen eines Straßennetzes.....	52
4.1.2.1	Schließen des Straßennetzes .....	54
4.2	Definition des Höhenverlaufs .....	67
4.3	Definieren des Straßenlayouts.....	68
4.3.1	Straßenquerschnitt.....	68
4.3.2	Spurbreitenveränderung.....	70
4.3.3	Linienführung in Knotenpunkten.....	72
4.3.4	Definition und Positionierung von Objekten .....	76
5	Umsetzung und Anwendung des Konzeptes .....	79
5.1	Die Funktion CloseRoadNetwork .....	79
5.1.1	Implementierung der Funktion.....	79
5.1.2	Ergebnisse und Bewertung der Funktion closeRoadNetwork .....	80
5.2	Dateninput und Dateiformat zur Anwendung des Tools .....	87
5.3	Anwendung und Bewertung des Konzeptes.....	89
5.3.1	Umsetzung des Konzeptes am Beispiel einer T-Kreuzung .....	89
5.3.2	Darstellung und Bewertung der generierten OpenDRIVE-Dateien .....	92
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	96
6.1	Zusammenfassung und Diskussion der Arbeit .....	96
6.2	Ausblick .....	97
7	Formelzeichen und Indizes .....	99
8	Abbildungsverzeichnis .....	101
9	Abkürzungsverzeichnis.....	104
10	Literatur .....	105
11	Anhang .....	110
11.1	Additionstheoreme.....	110
11.2	Reihenentwicklung der trigonometrischen Funktionen.....	110
11.3	Eindeutigen Bestimmung der Lage der Vektoren zueinander .....	110
11.4	Analyse zum Aufbau eines realen Straßennetzes – Verkehrseinflüsse.....	112

11.5 Handbuch .....	113
---------------------	-----

## 1 Einleitung und Motivation

In der Automobilindustrie zeichnet sich in den letzten Jahren zunehmend ein Trend zu automatisierten Fahrfunktionen sowie dem autonomen Fahren ab. Dabei steht vor allem die erhöhte Sicherheit im Straßenverkehr durch diese Systeme im Vordergrund. Allein im Jahr 2018 hat die Polizei in Deutschland mehr als 2,6 Millionen Verkehrsunfälle erfasst, wobei die Zahl der Verunglückten (umfasst Verletzte und Getötete) bei knapp 400 000 Personen lag [BUN19]. Ausschlaggebend für die meisten Verkehrsunfälle ist ein Fehlverhalten oder eine Unaufmerksamkeit des Fahrers. Durch die Entwicklung assistierender und autonomer Fahrfunktionen soll der Fahrer unterstützt bzw. sogar vollständig entlastet werden.

Des Weiteren liefern diese Systeme einen erhöhten Fahrkomfort, da der Fahrer sich nicht mit der Fahraufgabe beschäftigen muss und seine Zeit während der Fahrt beliebig nutzen kann. Weiterhin lassen sich dadurch die immer strengereren Grenzwerte zur Schadstoffemission einhalten, da die Assistenzsysteme vorausschauend agieren und den Antriebsstrang dadurch immer im bestmöglichen Betriebspunkt betreiben.

Die Zulassung eines Fahrerassistenzsystems für den öffentlichen Straßenverkehr erfordert die Einhaltung einiger Sicherheitsanforderungen, um eine einwandfreie Funktionsweise sicherstellen zu können. Diese beziehen sich sowohl auf die technischen Komponenten als auch auf die Software. Zu den Anforderungen zählt unter anderem der fehlerfreie Funktionsnachweis auf mehreren Millionen Testkilometern. Um Funktionsfehler in der Entwicklung frühzeitig zu erkennen, bietet sich die Simulation mit virtuellen Testszenarien an. Dadurch können beliebige Szenarien kreiert und kritische Fahrsituationen ohne die Gefährdung von Menschen dargestellt werden. Weiterhin werden sowohl Materialkosten für Prototypen sowie Entwicklungskosten durch Zeitersparnis eingespart.

Die Simulation stellt ein virtuelles Abbild der Realität dar und besitzt verschiedene Detailierungsgrade. Diese beinhalten zum einen eine makroskopische Betrachtung, bei der ein Verkehrsfluss ähnlich einem Fluidvolumenstrom simuliert wird. Zum anderen findet auf der mikroskopischen Ebene eine genauere Analyse der einzelnen Fahrzeuge statt. Die nanoskopische Simulation definiert die höchste Detaillierungsstufe und beschreibt die Interaktion zwischen dem Fahrzeug-, Fahrer- und Umweltmodell. Dafür ist es notwendig, dass diese Modelle eine hohe Realitätsnähe besitzen, allerdings auch beliebig konfigurierbar sind. Für die Beschreibung der Gesamtheit aller möglichen Szenarien dient das 6-Ebenen-Modell aus Abb. 1-1. In der ersten Ebene (engl. Layer) wird das Straßenlayout (engl. Street layer) und die Beschaffenheit der Straße beschrieben. Die Leitinfrastruktur (engl. Traffic infrastructure) wird durch die zweite Ebene repräsentiert. Temporäre Einflüsse (engl. Temporal modifications), die die ersten beiden Ebenen betreffen, wie die Spuränderung und die zugehörigen Verkehrsschilder durch eine Baustelle, werden in der dritten Ebene definiert. In den weiteren drei Ebenen werden die anderen dynamischen Objekte (engl. Movable objects), die Umwelteinflüsse (engl. Environment conditions) sowie die digitale Kommunikation (engl. Digital information) zwischen Fahrzeugen und der Umwelt beschrieben. Eine vollständige Streckenbeschreibung beinhaltet die ersten drei Ebenen des 6-Ebenen-Modells [ECK18].

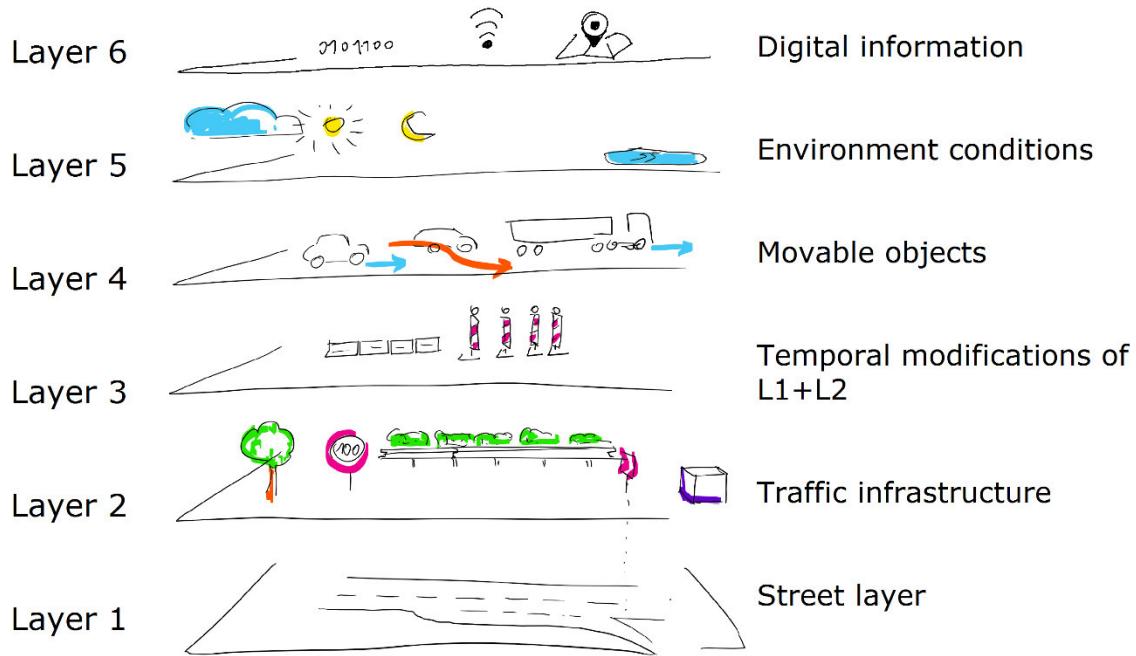


Abb. 1-1: 6-Ebenen-Modell zur Beschreibung von Szenarien [ECK18]

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Tools zur Erstellung logischer und variierbarer virtueller Strecken. Auf Basis des realen Entwicklungsprozesses des Straßenbaus und der Analyse eines realen Straßennetzes wird ein Konzept entwickelt, das die Erstellung logischer Strecken ermöglicht. Dafür wird das Straßennetz des Campus-Boulevard in Aachen in seine wesentlichen Bestandteile zerlegt und die Beziehungen zwischen diesen Grundbausteinen definiert. Des Weiteren werden die maßgebenden Parameter zur Erstellung dieser Grundbausteine ermittelt und kategorisiert. Analog zu dieser Unterteilung wird das Konzept modular aufgebaut. Durch eine relative Anordnung der einzelnen Bausteine zueinander wird die Variabilität des virtuellen Straßennetzes sichergestellt. Weiterhin wird die Benutzerschnittstelle durch die Entwicklung eines Eingabeformates definiert, wobei eine hohe Benutzerfreundlichkeit vor allem durch unterstützende Funktionen sowie die relative Angabe von Parametern erreicht wird. Abschließend wird das Konzept exemplarisch umgesetzt und dessen Funktionsweise bewertet. Eine Diskussion der Ergebnisse zeigt das weitere Vorgehen auf und hebt das Entwicklungspotential des Konzeptes hervor.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Fahrerassistenzsysteme unterstützen bzw. assistieren den Fahrer bei seiner Fahraufgabe. Diese unterteilt sich in die Navigations-, die Bahnführungs- und die Stabilisierungsebene. Die Navigationsaufgabe beinhaltet die Routenwahl und dessen dynamische Anpassung bei Störeinflüssen. In der Bahnführungsebene werden die Führungsgrößen, wie Sollspur und Sollgeschwindigkeit gewählt und die Abweichung zwischen Ist- und Sollgröße wahrgenommen. In der dritten Ebene, der Stabilisierungsebene, sorgt der Fahrer durch korrigierende Stelleingriffe dafür, die Abweichung zwischen Ist- und Sollgröße zu minimieren. Damit ein Fahrerassistenzsystem Fahraufgaben übernehmen kann ist es notwendig, dass die Verkehrssituation wahrgenommen wird, die Informationen verarbeitet und interpretiert werden und anschließend die richtige Handlung getroffen wird. Anhand der Handlungen eines Fahrerassistenzsystems lassen sich diese in informierende, interagierende und übernehmende Systeme gliedern [BRE04, WIN15, KOR17, PAY17].

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen und der Stand der Technik zum Verständnis der Arbeit dargestellt. Zunächst werden die Vorteile einer virtuellen Verkehrssimulation erläutert und auf dessen Detaillierungsgrade sowie Teilmodelle eingegangen. Im Kapitel der mathematischen Grundlagen werden alle nötigen Herleitungen und Formeln für spätere Berechnungen dargelegt. Anschließend folgt eine detaillierte Erläuterung zum Erstellungsprozess realer Straßen. Danach werden die Abstraktionsebenen von Szenarien und die Analogie zur Straßenbeschreibung erläutert. Abschließend wird OpenDRIVE, ein in der Branche gängiges und etabliertes Dateiformat zur Streckenbeschreibung, vorgestellt.

### 2.1 Virtuelle Verkehrssimulation

Die Zulassung von Fahrerassistenzsystemen für den öffentlichen Straßenverkehr erfordert die Erfüllung einiger Anforderungen. Diese beziehen sich hauptsächlich auf die Sicherheit des technischen Systems und das damit verbundene Gefährdungspotenzial auf den Menschen. Ein Teil dieser Anforderungen ist die Durchführung einer großen Anzahl an fehlerfreien Testkilometern auf öffentlichen Straßen im Realverkehr. Die Anzahl der Testkilometer ist wesentlich abhängig von dem zu testenden System, der Fahrzeugklasse, dem Einsatzbereich, dem Unfallfolgentyp, der Unfallverursachung und Vergleichsfahrzeugen. Beispielsweise wurden vor der Freigabe der E-Klasse (W212) von Daimler insgesamt 36 Millionen Testkilometer zurückgelegt [MAU15].

Das Testen von Fahrerassistenzsystemen in einem realistischen Verkehrsumfeld ist grundsätzlich auf zwei verschiedene Art und Weisen möglich.

In der ersten Variante werden die Systeme im realen Straßenverkehr eingesetzt. Auf diese Weise werden sie den Anforderungen ausgesetzt, denen sie auch im späteren Lebenszyklus unterliegen. Für den Einsatz im realen Verkehrsumfeld ist allerdings eine streckenbasierte Sondergenehmigung notwendig. Diese wird für jeden Prototypen individuell vergeben und setzt ein weit entwickeltes System voraus, bei dem auch der konstruktive Aspekt beachtet

wird. Aufgrund der hohen Varianten- und Versionsvielfalt in der heutigen Automobilindustrie erfordern die Realtestfahrten einen hohen Material- und Personeneinsatz, die wiederum hohe Kosten verursachen und viel Zeit in Anspruch nehmen. Ein weiteres Problem ist die Reproduzierbarkeit der einzelnen Fahrszenarien für die Bewertung, da die anderen Verkehrsteilnehmer ein stochastisches Verhalten aufweisen. Auch das Testen der Systemgrenzen und somit das Untersuchen von extremen Fahrmanövern gestaltet sich als schwierig, da ein hohes Gefährdungspotential für unbeteiligte Personen vorliegt. Des Weiteren zeigt sich im klassischen Alltagsverkehr keine große Bandbreite an verschiedenen Verkehrssituationen. Dies führt dazu, dass gewisse Testszenarien im realen Verkehrsumfeld regelrecht gesucht werden müssen [BRE04].

Die zweite Möglichkeit zum Testen der Fahrerassistenzsysteme ist die computergestützte Simulation. Diese vereinfacht und beschleunigt den Entwicklungsprozess, da ohne den Aufwand von teuren Prototypen oder Prüfständen im frühzeitigen Entwicklungszustand die Leistungsfähigkeit des Produktes untersucht werden kann und mögliche Schwachstellen frühzeitig behoben werden können. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, den Entwicklungsprozess iterativ zu gestalten und somit das Lösungskonzept mit den gestellten Anforderungen zu vergleichen. Bei der virtuellen Verkehrssimulation ist es wichtig, dass die gesamte Verkehrsumgebung inklusive anderer Verkehrsteilnehmer simuliert wird und die Reaktionen des untersuchenden Fahrzeugs getestet werden [BRE04, WIN15].

Simulationsmodelle sind allerdings immer nur Abbildungen der Realität und besitzen somit immer Vereinfachungen der Komplexität der realen Welt. Die Simulation setzt unter anderem voraus, dass das zu testende Szenario bekannt ist, damit eine vollständige Beschreibung und anschließende Darstellung möglich ist. Da die Komplexität der Realität nicht vollständig simuliert werden kann, werden sicherheitsrelevante Systeme abschließend immer mit realen Fahrzeugen, realen Menschen und realer Umwelt getestet [MAU15].

Im Rahmen der Arbeit wird ein Tool entwickelt, welches die Erstellung logischer und variierbarer virtueller Strecken ermöglicht. Zur Einordnung des Themas in den Kontext der virtuellen Verkehrssimulation werden die einzelnen Detaillierungsgrade sowie die wesentlichen Teilmodelle vorgestellt.

### 2.1.1 Detaillierungsgrad von Verkehrssimulationen

In der Verkehrssimulation ist die zu erfüllende Realitätsnähe von großer Bedeutung. Der Detailierungsgrad der Modellierung von Fahrzeug und deren Verhalten im Straßenverkehr bestimmen den Rechenaufwand. Diesbezüglich ist es vorteilhaft die erforderliche Genauigkeit an die Erfordernisse der Simulation vorab zu bestimmen. Grundsätzlich gibt es die vier Modelle (makroskopisch, mesoskopisch, mikroskopisch und nanoskopisch), nach denen der Detailierungsgrad der Verkehrssimulation klassifiziert wird.

In der makroskopischen Verkehrssimulation wird die Gesamtheit aller Fahrzeuge als kontinuierlicher Volumenstrom betrachtet. Anhand dieser Betrachtungsweise, dass ein Volumenstrom durch ein Straßennetzwerk fließt, kann auf bereits vorhandene Ansätze aus

der Fluidsimulation zurückgegriffen werden. Die Fahrzeuge werden dabei nicht einzeln abgebildet, sondern repräsentieren die Teilchen eines gesamten Stroms, sodass das kollektive Verkehrsverhalten analysiert werden kann. Geeignet ist dieser Detaillierungsgrad für die Simulation von großflächigen Straßennetzten und die überregionalen Stauprognosen. Der Rechenaufwand ist hier im Verhältnis zu den anderen Modellen relativ gering, da unter anderem die Simulationszeitschritte im Bereich von mehreren Sekunden liegen.[BIT10, ERL07, BRE04, PAY17].

Die mikroskopische Verkehrssimulation betrachtet jedes einzelne Fahrzeug mit seinen Bewegungsgleichungen individuell. Besonders wird hier die Interaktion eines Fahrzeugs mit seinen Nachbarfahrzeugen untersucht. Der hohe Realitätsgrad wird durch die genaue Analyse der Bewegungsabläufe erreicht. Genutzt wird diese Simulationsform um beispielsweise den Geschwindigkeitsverlauf und die Trajektorie bei Verkehrssteuerungsmaßnahmen wie Kreuzungen zu untersuchen. In dieser Detaillierungsstufe benötigen die Fahrzeuge eine gewisse Verhaltenscharakteristik, die entweder einen Fahrer oder ein Fahrerassistenzsystem repräsentiert. Die Simulationszeitschritte liegen hier im Bereich von einer Sekunde oder weniger [VOR88, ERL07, BRE04, PAY17, BIT10].

Um den Rechenaufwand gering zu halten, die relevanten Bereiche allerdings so detailliert wie möglich analysieren zu können, bietet sich das Modell der mesoskopischen Verkehrssimulation an. In diesem Fall liegt eine Kombination aus einem mikroskopischen und einem makroskopischen Modell vor. Nutzen findet dieses Simulationsmodell beispielsweise bei der Analyse eines großen Straßennetzes, bei der die Knotenpunkte mikroskopisch und die Verbindungsstrecken zwischen den Knotenpunkten makroskopisch simuliert werden [ERL07, PAY17].

Der höchste Detaillierungsgrad wird mit der nanoskopischen Verkehrssimulation erreicht. Hier werden einzelne Funktionsgruppen oder Fahrzeugmechaniken und -steuerungen simuliert. Die fahrrelevanten Bauteile und die Auswirkungen auf andere Komponenten werden so detailliert wie möglich dargestellt und ihr Verhalten mit physikalisch korrekten Gesetzmäßigkeiten hinterlegt. Die einzelnen im Detail simulierten Funktionsgruppen werden durch abgestimmte Schnittstelle verknüpft, sodass die voneinander unabhängigen Teilmobile miteinander interagieren können. Diese detaillierte Simulation mit Zeitschritten im Bereich von Milli- bis Zehntelsekunden besitzt den Nachteil eines hohen Rechenaufwandes. Genutzt wird diese Modellform unter anderem, um die autonome Fahrzeugführung zu testen, da hier die Verhaltenscharakteristik eines Fahrerassistenzsystems detailliert nachgebildet werden kann und alle nötigen Informationen bezüglich Fahrzeug und Umwelt über die Schnittstellen vorliegen [BIT10, VOR88, PAY17, ERL07, BRE04].

### 2.1.2 Teilmodelle der Verkehrssimulation

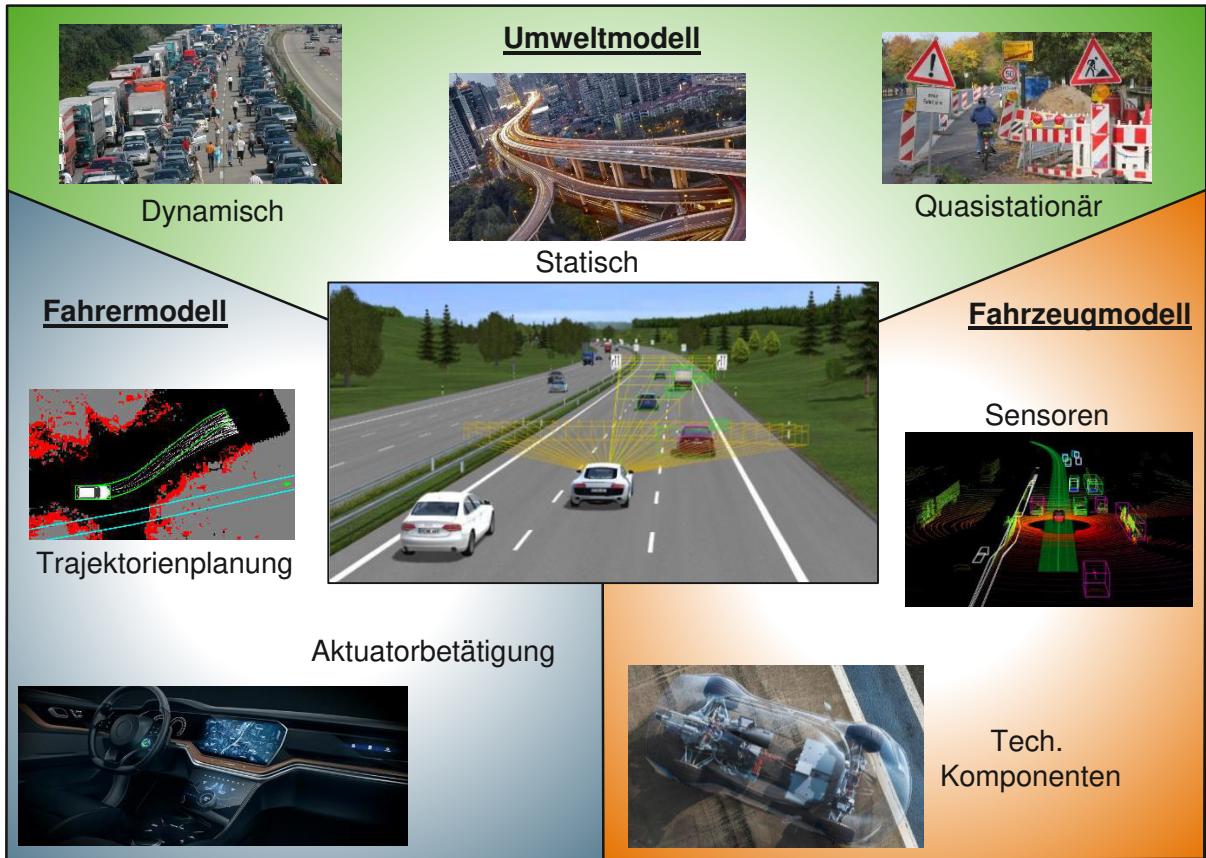


Abb. 2-1: Darstellung der Verkehrssimulation mit der Unterteilung in das Fahrer-, Fahrzeug- und Umweltmodell [EXT19, BLO19, UNI19, DEU16, BUS19, SPI08, PRE19, VIR19a]

Die zuvor vorgestellten Detailierungsgrade lassen sich weiterhin in wesentliche Teilmodelle unterteilen. Dabei differenziert man zwischen dem Fahrer-, Fahrzeug- und Umweltmodell, siehe Abb. 2-1. Diese Teilmodelle stehen in Wechselwirkung miteinander und ergeben über definierte Schnittstellen geschlossene Regelkreise. Eine klare Differenzierung zwischen den Teilmodellen liegt nur bei der nanoskopischen Verkehrssimulation vor, da dessen Definition auf der individuellen und detaillierten Analyse basiert. Die mikro-, makro- und mesoskopischen Verkehrssimulationen betrachten aufgrund ihres Detaillierungsgrades Kombinationen bzw. sogar den Wegfall einzelner Teilmodelle.

Das Fahrzeugmodell beschreibt das Verhalten und den Bewegungszustand jedes einzelnen Fahrzeugs. Die Schnittstellen dieses Modells sind zum einen die Streckeneigenschaften, die Einfluss auf das Fahrwerk haben, und andererseits das Fahrermodell, das die Handlungen vorgibt. Abhängig vom Anwendungsfall gibt es grundsätzlich zwei unterschiedliche Komplexitätsstufen: Das „synthetische Fahrzeug“ und das „Realfahrzeug“.

Unter der Betrachtung des synthetischen Fahrzeugs wird die Dynamik des Fahrzeugs beschrieben, ohne dabei auf die inneren Vorgänge einzugehen.

Das Realfahrzeug basiert auf dem Ursache-Wirkungs-Prinzip. Alle technischen Komponenten werden in Teilmodellen detailliert mit physikalisch korrektem Verhalten modelliert und über definierte Schnittstellen in Wechselwirkung mit den relevanten Komponenten gesetzt. Gibt das Fahrermodell beispielsweise eine Änderung der Gaspedalstellung vor, so resultiert für das Fahrzeugmodell eine Änderung des Motorbetriebspunktes. Diese Ursache liefert über die entsprechenden Schnittstellen eine Wirkung. In diesem Fall resultiert aus einer Änderung der Motordrehzahl auch eine Änderung der Beschleunigung und über die Bilanzierung der Fahrwiderstände eine Änderung der Fahrgeschwindigkeit. Zum Testen von autonomen Fahrfunktionen ist es notwendig, die Sensoren zur Umweltdetektion zu modellieren und dessen Kommunikationsschnittstelle mit dem Fahrermodell bereitzustellen.

Fahrermodelle beschreiben das Fahrverhalten der Umfeldverkehrsteilnehmer einer szenariobasierten Simulation. Das Fahrzeug unter Test erhält eine Fahrfunktion, die das Fahrverhalten abbildet. Sowohl Fahrermodelle, als auch Fahrfunktionen beschreiben das Fahrverhalten und können unter dem Oberbegriff Verhaltensmodell zusammengefasst werden. Dieses reagieren auf die wahrgenommenen Informationen aus der Fahrumgebung und auf das Bewegungsverhalten des Fahrzeugs. Grundsätzlich können Verhaltensmodelle in einen Verhaltens- und einen Handlungsteil unterteilt werden. Im Rahmen des Verhaltensteils werden folgende Sollgrößen berechnet:

- Gewünschte Fahrspur
- Wunschbeschleunigung
- Wunschgeschwindigkeit
- Sollversatz zur Fahrspurmitte
- Sollwinkel zur Tangente an die Fahrbahn

Im Handlungsteil werden die zuvor berechneten Sollgrößen in Aktuatorbetätigungen, wie beispielsweise Pedalerie, Lenkrad, Schalthebel oder Blinker, umgewandelt.

Als weiterer Punkt für eine reale Darstellung des Verhaltensmodells ist die genaue Betrachtung der physischen Leistungsfähigkeit eines realen Fahrers und dessen Fahrcharaktere. Durch eine Parametrisierung der verschiedenen Fahrstile kann eine realistische Verkehrsumgebung geschaffen werden, die sowohl aggressive als auch passive Fahrer darstellt.

Das dritte Teilmodell ist das sogenannte Umweltmodell. Dieses lässt sich wiederum in drei Unterkategorien unterteilen.

Die erste Kategorie beschreibt den statischen Teil der Simulation, der auch als Streckenmodell bezeichnet wird. Darunter fallen alle geometrischen Aspekte, die den Verlauf der Fahrbahn in horizontaler und vertikaler Richtung beschreiben. Unter anderem wird der Regelquerschnitt bestimmt und mit Markierungen versehen. Abschließend werden Objekte, wie Verkehrsschilder oder Lichtsignalanlagen in diesem Straßennetzwerk platziert.

In der zweiten Kategorie werden die dynamischen Teile der Umwelt modelliert. Dazu zählen vor allem andere Verkehrsteilnehmer, wobei dies sowohl Fußgänger, Fahrradfahrer als auch Fahrzeuge sein können.

Abschließend werden in der letzten Kategorie quasistationäre Objekte sowie die Beschaffenheit der Straße definiert. Diese Objekte sind nicht zeitkritisch, allerdings abhängig von Wetter und Position. Darunter fallen Umweltbedingungen wie Reibwerte und Sicht sowie beispielsweise Baustellen.

Um Fahrerassistenzsysteme zu testen, wird eine hohe Realitätsnähe und eine hohe Genauigkeit des Umweltmodells vorausgesetzt, da die im Fahrzeugmodell modellierten Sensoren die gleichen Bedingungen erhalten sollen, wie sie in der Realität vorliegen. Diesbezüglich müssen die Schnittstellen zwischen den Modellen klar definiert werden, da die für die Sensoren notwendigen Informationen im Umweltmodell mit der erforderlichen Genauigkeit enthalten sein müssen. [BRE04, KOR17, CHR08, CHR07]

Das Thema der Arbeit befasst sich mit der nanoskopischen Simulation, wobei die statischen und quasistationären Teile des Umweltmodells behandelt werden.

## 2.2 Mathematische Grundlagen

Im Rahmen der Arbeit werden die geometrischen Elemente Gerade, Kreisbogen und Klohoide genutzt und diese miteinander verbunden. Die mathematischen Grundlagen beinhalten die dafür benötigten Gleichungen mit ihren Herleitungen. Des Weiteren wird auf die Zusammenhänge zwischen dem geometrischen Verlauf, dem Winkelverlauf und dem Krümmungsband eingegangen.

### 2.2.1 Berechnungen der geometrischen Elemente

In diesem Kapitel werden nun für die drei genannten Geometrien Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Hauptpunkte hergeleitet. Hauptpunkte beschreiben die Koordinaten des Start- und Endpunktes der Geometrie. Zur Bestimmung dieser Koordinaten ist die Angabe der jeweiligen Bestimmungsgrößen erforderlich. Für eine Gerade ist dies ihre Länge  $L_g$ , ein Kreisbogen wird bestimmt durch dessen Radius  $R$  und die Kreisbogenlänge  $L_k$  und die Klohoide durch den Klohoidenparameter  $A$ , den Startradius  $R_s$  und den Endradius  $R_e$ . Des Weiteren müssen für alle Geometrien die Tangentenrichtung und die Krümmung für den Anfangspunkt bekannt sein. Im Folgenden werden für die einzelnen Geometrien jeweils Vorgehen beschrieben, mit denen ausgehend von einem bekannten ersten Hauptpunkt  $HP_0$  und der Angabe der Bestimmungsgrößen die Koordinaten des Endhauptpunktes  $HP_E$  bestimmt werden können.

#### **Gerade:**

Eine Gerade ist die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten und besitzt keine Krümmung. In Abb. 2-2 werden die roten Hauptpunkte  $HP_0$  und  $HP_E$  durch die blaue Gerade miteinander verbunden. Unter Voraussetzung der bekannten Koordinaten  $x_0$  und  $y_0$ , der Länge  $L_g$ , sowie der Orientierung der Gerade gegeben durch den Winkel  $\alpha$  lassen sich die Koordinaten des Hauptpunktes  $HP_E$  folgendermaßen bestimmen [WOL13]:

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + \Delta x \\ &= x_0 + s \cdot \cos(\alpha) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-1}$$

$$\begin{aligned} y_i &= y_0 + \Delta y \\ &= y_0 + s \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-2}$$

mit  $s \in [0, L_g]$

Dafür werden die Längen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  durch die trigonometrischen Beziehungen bestimmt, die in Abb. 2-2 dargestellt sind. Die Länge  $s$  beschreibt eine variable Länge der Graden, die entlang von  $L_g$  verläuft und in  $HP_0$  startet. Durch die Variation von  $s$ , wobei gilt  $0 \leq s \leq L_g$ , lassen sich beliebige Punkte  $(x_i|y_i)$  auf der Geraden bestimmen. Wird  $s = L_g$  eingesetzt, so erhält man die Koordinaten  $(x_E|y_E)$  von  $HP_E$  aus Abb. 2-2.

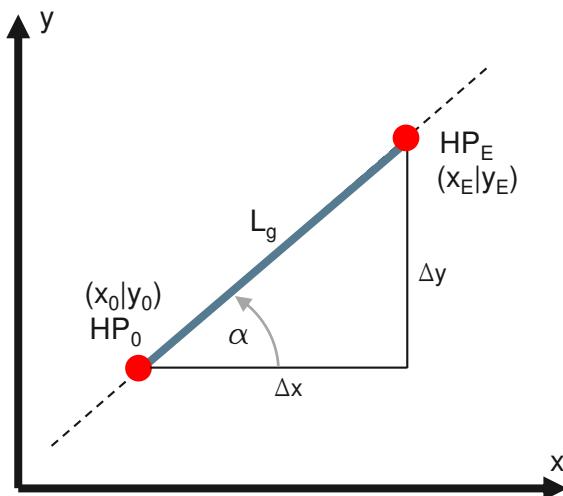


Abb. 2-2: Vorgehen zur Berechnung der Hauptpunkte einer Geraden

### Kreisbögen:

Ein Kreisbogen verbindet zwei Punkte mit einer konstanten Krümmung, die ungleich Null ist. In Abb. 2-3 ist in blau ein Kreisbogen dargestellt, der die beiden Hauptpunkte verbindet. Zur Ermittlung der Koordinaten eines beliebigen Punktes  $(x_i|y_i)$  auf dem Kreisbogen ausgehend von  $HP_0$  müssen die Kreisbogenlänge  $L_k$ , der Radius sowie die Koordinaten des Startpunktes bekannt sein. In Abb. 2-3 (a) findet die Ermittlung der Koordinaten des Endpunktes mithilfe der Sehnenlänge  $S$  des Kreisbogens und dem Sehnen-Tangentialen-Winkel  $\sigma$ , der zwischen der Sehne durch die Hauptpunkte und der Tangente im Startpunkt aufgespannt wird, statt. Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + \Delta x \\ &= x_0 + S \cdot \cos(\sigma) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-3}$$

$$\begin{aligned} y_i &= y_0 + \Delta y \\ &= y_0 + S \cdot \sin(\sigma) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-4}$$

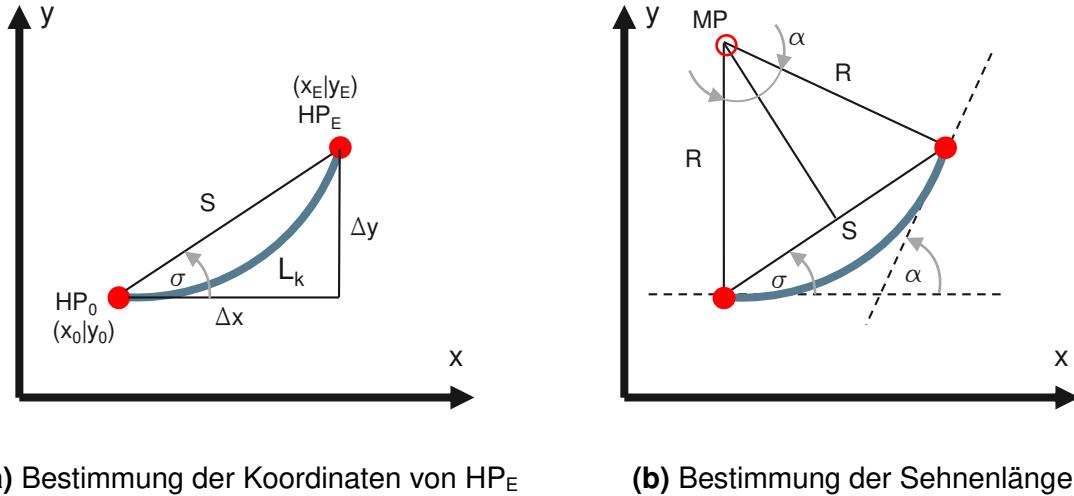


Abb. 2-3: Vorgehen zur Berechnung der Hauptpunkte eines Kreisbogens

Mithilfe von Abb. 2-3 (b) werden nun die unbekannten Parameter  $S$  und  $\sigma$  ermittelt. Zur Bestimmung der Sehne wird der Mittelpunkt MP, sowie der Radius  $R$  und der Öffnungswinkel  $\alpha$  des Kreisbogens angetragen. Die schwarz gestrichelten Linien zeigen die Tangenten in den beiden Hauptpunkten, wobei dessen Schnittwinkel dem Öffnungswinkel entspricht. Unter Zuhilfenahme der Winkelhalbierenden für den Öffnungswinkel kann mit den trigonometrischen Funktionen ein Zusammenhang für die Sehnenlänge aufgestellt werden:

$$S = 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{Gl. 2-5}$$

Unter Nutzung der Komplementärwinkel und der Winkelgesetze ergibt sich ein Zusammenhang zwischen dem Öffnungswinkel  $\alpha$  und dem Sehnen-Tangentialen-Winkel  $\sigma$ :

$$\begin{aligned} \alpha + 2 \cdot (90^\circ - \sigma) &= 180^\circ \\ \Leftrightarrow \sigma &= \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-6}$$

Einsetzen der Gl. 2-5 und Gl. 2-6 in Gl. 2-7 ergibt:

$$x_i = x_0 + 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{Gl. 2-7}$$

Durch Anwendung des Additionstheorems aus Gl. 11-1 wird der Ausdruck vereinfacht zu:

$$x_i = x_0 + R \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Gl. 2-8}$$

Analog zur x-Koordinate werden die Gl. 2-5, Gl. 2-6 und Gl. 11-2 in Gl. 2-4 eingesetzt, sodass folgender Zusammenhang entsteht:

$$y_i = y_0 + R \cdot (1 - \cos(\alpha)) \quad \text{Gl. 2-9}$$

Zur Ermittlung des Öffnungswinkels  $\alpha$  wird die Darstellung im Bogenmaß genutzt:

$$\alpha = \frac{s}{R} \quad \text{Gl. 2-10}$$

mit  $s \in [0, L_k]$

Mit den hergeleiteten Gleichungen lassen sich nun ausgehend von einem bekannten Startpunkt  $HP_0$  und mit bekannten Bestimmungsgrößen des Kreisbogens die Koordinaten eines beliebigen Punktes  $(x_i | y_i)$  auf dem Kreisbogen bestimmen. Die Länge  $s$  beschreibt eine variable Länge des Kreisbogens, die entlang von  $L_k$  verläuft und in  $HP_0$  startet. Es gilt  $0 \leq s \leq L_k$  einzuhalten und durch einsetzen von  $s = L_k$  können die Koordinaten von  $HP_E$  bestimmt werden [WOL13, OST91].

### Klothoide:

In Abb. 2-4 ist eine Klothoide, auch Euler-Spirale genannt, mit ihren beiden Ästen in einem Koordinatensystem dargestellt. Diese beschreibt eine ebene Kurve, die im Wendepunkt keine Krümmung besitzt und dessen Äste sich in beide Richtungen spiralartig um einen festen Punkt wickeln. Ein besonderes Merkmal der Klothoide ist die Proportionalität zwischen der Krümmung und der zugehörigen Spirallänge. Dabei ändert sich die Krümmung linear mit der Spirallänge. Diese Proportionalität wird durch die Klothoidengleichung repräsentiert:

$$R \cdot L = A^2 \quad \text{Gl. 2-11}$$

Innerhalb dieser beschreibt der Parameter  $L$  ausgehend von einem Startpunkt die Länge bis zu einem betrachteten Punkt auf der Klothoide.  $R$  steht für den Krümmungsradius in dem Punkt und der Parameter  $A$  beschreibt den Klothoidenparameter, der für eine Klothoide konstant ist und dessen SI-Einheit m ist.

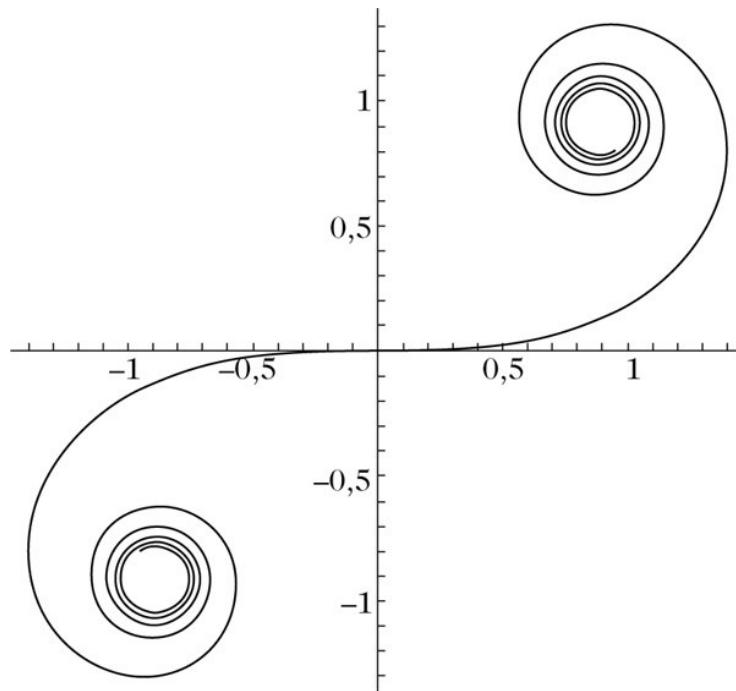


Abb. 2-4: Darstellung einer Klohoide mit beiden Ästen [SPE17]

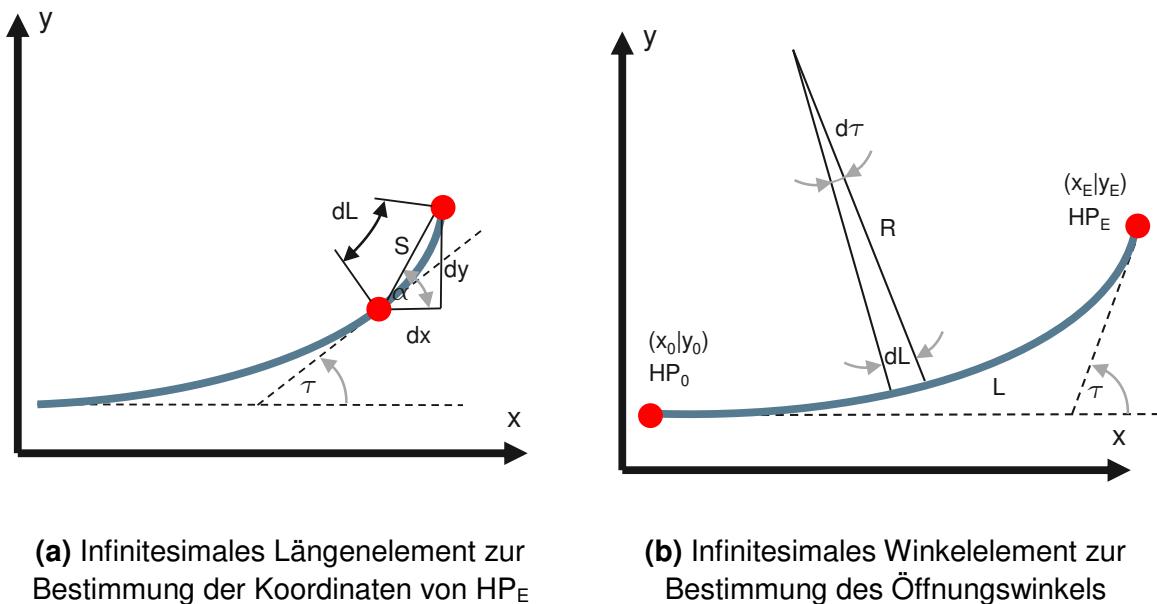


Abb. 2-5: Vorgehen zur Berechnung der Hauptpunkte einer Klohoide

Zur Bestimmung der Koordinaten eines beliebigen Hauptpunktes einer Klohoide ausgehend von dessen Wendepunkt wird zunächst ein infinitesimales Element der Kurve betrachtet. In Abb. 2-5 Bild (a) ist in blau die Kurve dargestellt, wobei der Bereich zwischen den roten Punkten infinitesimal klein ist. Die schwarz gestrichelten Linien sind die Tangenten der Klohoide in den jeweiligen Punkten, wobei zusätzlich der Schnittwinkel  $\tau$  angetragen ist, der

auch als Öffnungswinkel der Klothoide bezeichnet wird. Daraus ergeben sich für die Abstände zwischen den Punkten folgende Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} dx &= S \cdot \cos(\alpha) \\ dy &= S \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-12}$$

Da hier ein infinitesimales Kurvenelement betrachtet wird, konvergiert die Kurvenlänge  $dL$  gegen Null. Daraus lässt sich schließen, dass  $S \rightarrow dL$  und  $\alpha \rightarrow \tau$  konvertiert, sodass Gl. 2-12 umgeschrieben werden kann:

$$\begin{aligned} dx &= dL \cdot \cos(\tau) \\ dy &= dL \cdot \sin(\tau) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-13}$$

Zur Bestimmung des Öffnungswinkels  $\tau$  wird die Darstellung im Bogenmaß genutzt. Dabei wird ein infinitesimaler Winkel betrachtet, der in Bild (b) der Abb. 2-5 dargestellt ist. Durch Einsetzen der Klothoidengleichung aus Gl. 2-11 folgt:

$$d\tau = \frac{1}{R} \cdot dL = \frac{L}{A^2} \cdot dL \quad \text{Gl. 2-14}$$

Aufsummieren der infinitesimalen Elemente über die Spirallänge liefert den Zusammenhang zwischen dem Öffnungswinkel und den Bestimmungsgrößen einer Klothoide:

$$\tau = \int_0^L \frac{L_1}{A^2} dL_1 = \frac{L^2}{2 \cdot A^2} = \frac{L}{2 \cdot R} \quad \text{Gl. 2-15}$$

Dabei fällt auf, dass der Öffnungswinkel des Kreisbogens, siehe Gl. 2-10, exakt doppelt so groß ist wie der Öffnungswinkel der Klothoide. Einsetzen der Gl. 2-14 und Gl. 2-15 in die x-Koordinate der Gl. 2-13 führt zu:

$$\begin{aligned} dx &= \cos(\tau) \cdot \frac{A^2}{L} \cdot d\tau \\ &= \cos(\tau) \cdot \frac{A}{\sqrt{2 \cdot \tau}} \cdot d\tau \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-16}$$

Aufsummieren der infinitesimalen Winkel über den gesamten Öffnungswinkel des Klothoidenabschnittes führt zu:

$$x = \frac{A}{\sqrt{2}} \cdot \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau_1}} \cdot \cos(\tau_1) d\tau_1 \quad \text{Gl. 2-17}$$

Dieses Vorgehen kann analog für die y-Koordinate aus Gl. 2-13 durchgeführt werden, sodass gilt:

$$y = \frac{A}{\sqrt{2}} \cdot \int_0^{\tau} \frac{1}{\sqrt{\tau_1}} \cdot \sin(\tau_1) d\tau_1 \quad \text{Gl. 2-18}$$

Die beiden Ausdrücke aus Gl. 2-17 und Gl. 2-18 sind Fresnel'sche Integrale, die mit den Grundregeln der Integralrechnung nicht gelöst werden können. Gelöst wird das Problem durch Anwendung der Reihenentwicklungen der trigonometrischen Funktionen aus Gl. 11-3 und Gl. 11-4. Einsetzen dieser Gleichungen in Gl. 2-17 und Gl. 2-18 führt zur Lösung der Integrale:

$$\begin{aligned} x &= \frac{A}{\sqrt{2}} \cdot \int_0^{\tau} \left( \tau_1^{-1/2} - \frac{\tau_1^{3/2}}{2!} + \frac{\tau_1^{7/2}}{4!} \pm \dots \right) d\tau_1 \\ &= A \cdot \sqrt{2 \cdot \tau} \cdot \left( 1 - \frac{\tau^2}{5 \cdot 2!} + \frac{\tau^4}{9 \cdot 4!} - \frac{\tau^6}{13 \cdot 6!} \pm \dots \right) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-19}$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{A}{\sqrt{2}} \cdot \int_0^{\tau} \left( \tau_1^{1/2} - \frac{\tau_1^{5/2}}{3!} + \frac{\tau_1^{9/2}}{5!} \pm \dots \right) d\tau_1 \\ &= A \cdot \sqrt{2 \cdot \tau} \cdot \left( \frac{\tau}{3} - \frac{\tau^3}{7 \cdot 3!} + \frac{\tau^5}{11 \cdot 5!} - \frac{\tau^7}{15 \cdot 7!} \pm \dots \right) \end{aligned}$$

Da diese Reihen schnell konvergieren, fallen die Terme höherer Ordnung weg. Nach [WOL13] besitzt eine sehr große Klohoide mit  $A = 1000m$  und  $L = 1000m$  eine Genauigkeit im Bereich eines Zehntelmillimeters, sodass geschrieben werden kann [WOL13, OST91]:

$$\begin{aligned} x &= L \cdot \left( 1 - \frac{\tau^2}{10} + \frac{\tau^4}{216} - \frac{\tau^6}{9360} \right) \\ y &= L \cdot \left( \frac{\tau}{3} - \frac{\tau^3}{42} + \frac{\tau^5}{1320} \right) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-20}$$

Um die Koordinaten eines beliebigen Punktes  $(x_i|y_i)$  in Abhängigkeit eines bekannten Hauptpunktes  $\text{HP}_0$  bestimmen zu können, ergeben sich durch Einsetzen der Gl. 2-15 die folgenden Ausdrücke:

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + s \cdot \left( 1 - \frac{s^2}{40 \cdot R^2} + \frac{s^4}{3456 \cdot R^4} - \frac{s^6}{599040 \cdot R^6} \right) \\ y_i &= y_0 + s \cdot \left( \frac{s}{6 \cdot R} - \frac{s^3}{336 \cdot R^3} + \frac{s^5}{42240 \cdot R^5} \right) \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-21}$$

mit  $s \in [0, L]$

Dabei beschreibt  $s$  die Klohoidenlänge von  $\text{HP}_0$  aus, für die  $0 \leq s \leq L$  gilt. Die Koordinaten des Hauptpunktes  $\text{HP}_E$  werden durch Einsetzen von  $s = L$  berechnet.

### 2.2.2 Das Krümmungsband

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden drei Randbedingungen zur Verknüpfung zweier Geometrien genutzt. Als erstes ist die geometrische Übereinstimmung zwischen den Verbindungspunkten der beiden Geometrien sicherzustellen. Des Weiteren sind die Geometrien tangential miteinander zu verbinden. Das heißt, dass der Winkelverlauf bzw. die tangentiale Orientierung stetig ist (engl. Tangetial Orientation). In Abb. 2-6 ist ein beispielhafter Streckenverlauf bestehend aus blauen Geraden (engl. line), gelben Kreisbögen (engl. arc) und roten Klothoiden (engl. spiral) dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist der geometrische Verlauf der Strecke aus der Draufsicht (engl. Plan View) zu sehen, wobei die Achsen in diesem Fall die x-/y-Koordinaten darstellen. Der Winkelverlauf ist die erste Ableitung des geometrischen Verlaufs nach einer mitbewegten Laufkoordinate  $s$ . Für den beispielhaften Streckenverlauf ist der Graph des Winkelverlaufs oben rechts dargestellt. Auf der x-Achse ist die Laufkoordinate  $s$  angetragen und auf der y-Achse der Winkel zur x-Achse.

Die dritte Bedingung zur Verknüpfung zweier Geometrien ist das Vermeiden von Krümmungssprüngen. Die Krümmung (engl. curvature) ist der Kehrwert des Radius und verhält sich proportional zum Lenkwinkel, d.h., dass ein Fahrer oder eine Fahrfunktion mit zunehmender Krümmung der Straße den Lenkwinkel erhöhen muss. Eine Gerade besitzt keinen Radius, sodass auch die Krümmung Null ist und kein Lenkwinkel erforderlich ist. Ein Kreisbogen wird durch einen konstanten Radius bestimmt. Dadurch besitzt auch die Krümmung einen konstanten Wert und der Fahrer muss einen konstanten Lenkwinkel auftragen. Eine Klothoide besitzt wie im Kapitel zuvor erläutert einen Verlauf, bei dem der Radius in Abhängigkeit von der Klothoidenlänge einen linearen Änderungsverlauf aufweist, weshalb auf einer Klothoide ein linear ändernder Lenkwinkel benötigt wird. Das Krümmungsband ist die Ableitung des Winkelverlaufs in Abhängigkeit von der Laufkoordinate  $s$  und dementsprechend auch die zweite Ableitung des geometrischen Verlaufs. Dargestellt ist so ein Graph unten rechts in der Abbildung. Dabei wird anhand des Beispiels verdeutlicht, dass Geraden eine Krümmung von Null, Kreisbögen einen konstanten Wert und Klothoiden einen linearen Krümmungsverlauf besitzen. Auf der x-Achse des Diagramms ist die Laufkoordinate  $s$  und auf der y-Achse die Krümmung angetragen. Diese Überlegungen lassen sich allgemeingültig für alle Geometrien durch folgende Ausdrücke mathematisch beschreiben [BEC17]:

$$\begin{aligned} x(s) &= \int_0^s \cos(\Phi(t)) dt + x_0 \\ y(s) &= \int_0^s \sin(\Phi(t)) dt + y_0 \\ \text{mit } \Phi(s) &= \int_0^s \kappa(t) dt + \Phi_0 \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-22}$$

Dabei entspricht  $\kappa$  dem jeweiligen Krümmungswert bzw. -verlauf der Geometrie. Werden im weiteren Verlauf der Arbeit geometrische Verläufe, Winkelverläufe oder Krümmungsbänder

dargestellt, so werden diese nach der vorgestellten Herleitung ermittelt und dementsprechend dargestellt.

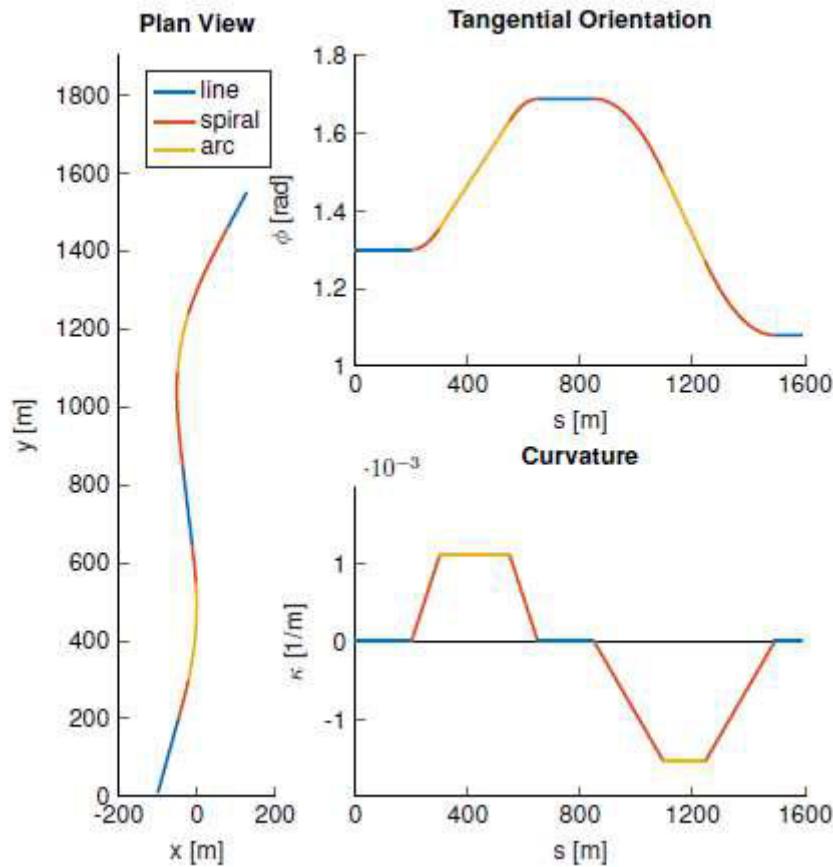


Abb. 2-6: Geometrischer Verlauf, Winkelverlauf und Krümmungsband eines beispielhaften Streckenverlaufs bestehend aus Geraden, Kreisbögen und Klothoiden [BEC17]

### 2.3 Entwurf und Gestaltung realer Straßen

Für die Erstellung realitätsnaher virtueller Straßen ist die Analyse der realen Straßen und dessen Erstellungsprozess von Interesse. Die virtuellen Straßen sollen digitale Zwillinge der realen Straßen darstellen. Der reale Straßenbau besitzt bereits eine lange Geschichte und weist somit viel Erfahrung in diesem Bereich auf, das übertragen werden kann [LÖT01].

Im Planungsprozess für den Bau einer Straßen besitzt ein sehr umfangreiches Spektrum an Einflussbereichen ein Mitspracherecht. Diesbezüglich werden neben rein geometrischen Aspekten auch Aspekte der Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, Sicherheit und moralische Aspekte betrachtet. Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich die Arbeitsschritte und Vorgehensweisen zur Entwurfsausarbeitung betrachtet, da nur diese Relevanz für die Problemstellung besitzen. Es wird also vorausgesetzt, dass ein Bedarfsplan vorliegt, die Notwendigkeit einer Straße existiert und auch der grobe Untersuchungsbereich genehmigt ist. Im Folgenden wird der Planungsablauf in drei wesentliche Entwicklungsetappen unterteilt: Vorplanung, Vorentwurf und Detailentwurf. Abb. 2-7 zeigt den chronologischen Aufbau der

einzelnen Arbeitsschritte zur Erstellung einer realen Straße. Diese Abbildung dient im gesamten Kap. 2.3 als Leitfaden und Orientierungshilfe [WOL13].

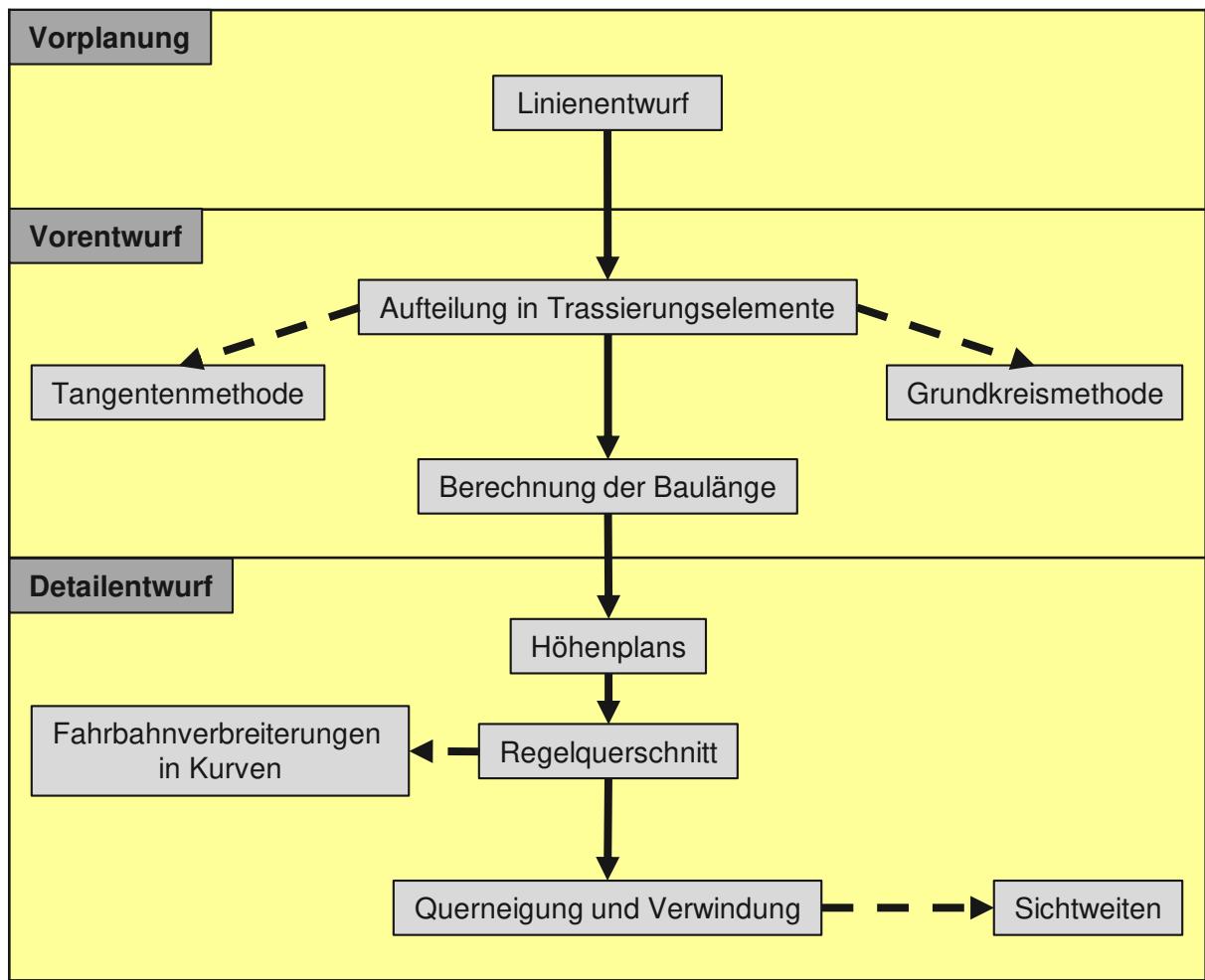


Abb. 2-7: Chronologische Darstellung der Arbeitsschritte zur Erstellung realer Straßen [PIE00, LÖT01]

### 2.3.1 Vorplanung (Linienentwurf)

Die Vorplanung befasst sich mit der Feststellung des Planungsraumes und der Analyse aller planungsrelevanter Daten. Es wird eine Linienführung erstellt und eine erste Abschätzung der Folgen und Auswirkungen auf das Umfeld der Straße kalkuliert. Das Vorgehen zur Erstellung eines ersten Linienentwurfs wird am Beispiel einer Musterstadt aus Abb. 2-8 erläutert.

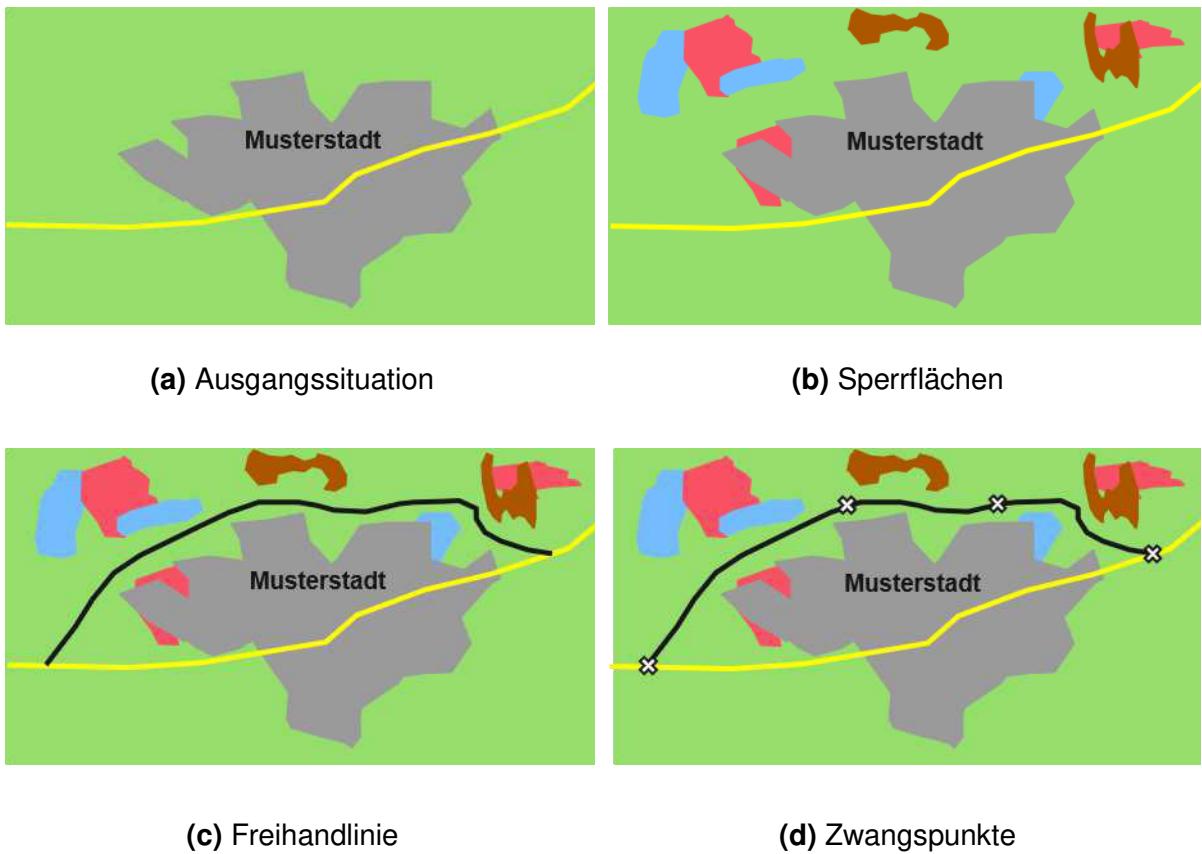


Abb. 2-8: Einzelschritte bis zum Linienentwurf am Beispiel einer Musterstadt [STR19]

In Bild (a) von Abb. 2-8 ist die Ausgangssituation dargestellt. Diese wird durch das aktuelle Kartenmaterial repräsentiert, wobei die graue Fläche für eine beispielhafte Musterstadt steht und die gelbe Linie für eine Straße. Laut Bedarfsplan ist nun eine Umgehungsstraße für Musterstadt geplant. Im ersten Schritt findet auf Basis der Karte eine Raumanalyse statt. Es werden Sperrflächen definiert, um das Untersuchungsgebiet etwas einzuschränken. Zur Identifikation von Sperrflächen gibt es unterschiedliche Betrachtungsweisen. Aus Sicht der Umwelt bringt die Straße eine hohe Luftverschmutzung und viel Lärm mit sich, sodass Wohnanlagen und Naturschutzgebiete gemieden werden sollen. Die Betrachtung aus wirtschaftlicher Sicht priorisiert eine Baukostenminimierung, bei der Flüsse, Seen und Wälder bevorzugt gemieden werden, um Zusatzkosten zu vermeiden. Des Weiteren soll durch den Bau der Straße das Ortsbild der Stadt nicht geschädigt und zukünftige städtebauliche Entwicklungsmöglichkeiten nicht behindert werden. In Abb. 2-8 Bild (c) sind diese Sperrflächen durch blaue, braune und pinke Flächen dargestellt. Nachdem der Untersuchungsraum klar definiert ist, wird in das Kartenmaterial eine Freihandlinie eingezeichnet, die die Referenzlinie der neuen Trasse darstellt (siehe Bild (c) schwarze Linie). Abschließend können sogenannte Zwangspunkte auf der Freihandlinie definiert werden. Diese Punkte werden in Bild (d) durch weiße Kreuze dargestellt und müssen im abschließendem Detailentwurf von der Straße eingehalten werden [LÖT01, WOL13, PIE00]

### 2.3.2 Vorentwurf (Lageplan)

In der zweiten Entwicklungsetappe, der Vorentwurfsphase, werden die vorausgegangenen Untersuchungen aus der Vorplanung zusammengefasst und eine technische Lösung ausgearbeitet. In dieser Phase werden wesentliche Merkmale der Straßenplanung festgelegt, sodass der Verlauf der Referenzlinie der Straße damit vollständig bestimmt ist.

In diesem Kapitel wird die in der Vorplanung erarbeitete Freihandlinie in geometrisch bestimmbare und fahrdynamisch geeignete Trassierungselemente aufgeteilt. Dabei wird in Kap. 2.3.2.1.1 zunächst auf die grundlegenden Trassierungselemente und anschließend in Kap. 2.3.2.1.2 und Kap. 2.3.2.1.3 auf die zwei wesentlichen Vorgehensweisen zur Aufteilung eingegangen. Abschließend wird in Kap. 2.3.2.2 die exakte Baulänge berechnet, wobei Radius und Klothoidenparameter an die entsprechenden Richtwerte angepasst werden.

Die erarbeiteten Vorgehensweisen zur Bestimmung der Referenzlinie werden im weiteren Verlauf der Arbeit an die virtuelle Streckenerstellung angepasst. Dabei werden die wesentlichen Trassierungselemente und die Richtwerte zu dessen Berechnung für die virtuelle Erstellung übernommen.

#### 2.3.2.1 Aufteilung in Trassierungselemente

Bei der Erstellung des Straßenverlaufs gelten an den Schnittstellen zweier Geometrien grundsätzlich die Bedingungen, dass die Verbindungspunkte übereinstimmen, tangentiale Übergänge realisiert werden und keine Krümmungssprünge vorliegen. Auch bei der Aufteilung der Freihandlinie in Trassierungselemente werden diese Bedingungen erfüllt.

##### 2.3.2.1.1 Trassierungselemente

Die im Straßenbau verwendeten geometrischen Elemente für den Entwurf der Referenzlinie sind die Gerade, der Kreisbogen und der Übergangsbogen, siehe Abb. 2-9. Seit Anbeginn des Straßenbaus nutzt man die Gerade, um Distanzen zu überbrücken. Die Gerade besitzt einen konstanten Winkel und eine Krümmung vom Wert Null. Eine Richtungsänderung wird mit einem Kreisbogen erzeugt. Dieser besitzt einen konstant steigenden Winkel und ein konstantes Krümmungsband. Bei der Kombination dieser beiden Elemente liegt allerdings ein Krümmungssprung vor. Dies wird in Abb. 2-9 verdeutlicht, da das Zusammensetzen der Krümmungsbänder einer Gerade und eines Kreisbogens ohne Sprung nicht möglich ist. Die Verwendung von schnellen Fahrzeugen erfordert jedoch einen Übergang mit einer langsamen Krümmungszunahme, damit die geplanten Fahrtrajektorien ohne Geschwindigkeitsminderung befahren werden können. Für den Übergangsbogen wird im Straßenbau das geometrische Element der Klohoide verwendet. In Abb. 2-9 ist am Krümmungsband der Klohoide deutlich zu erkennen, dass diese über die Länge eine konstante Steigung besitzt und so den Übergang zwischen Gerade und Kreisbogen ohne Krümmungssprung ermöglicht. Durch die Klohoide wird somit auch eine schlagartige Änderung der auftretenden Zentrifugalbeschleunigung vermeiden und ein angenehmes Fahrgefühl durch langsames Ein- und Auslenken ermöglicht [WOL13].

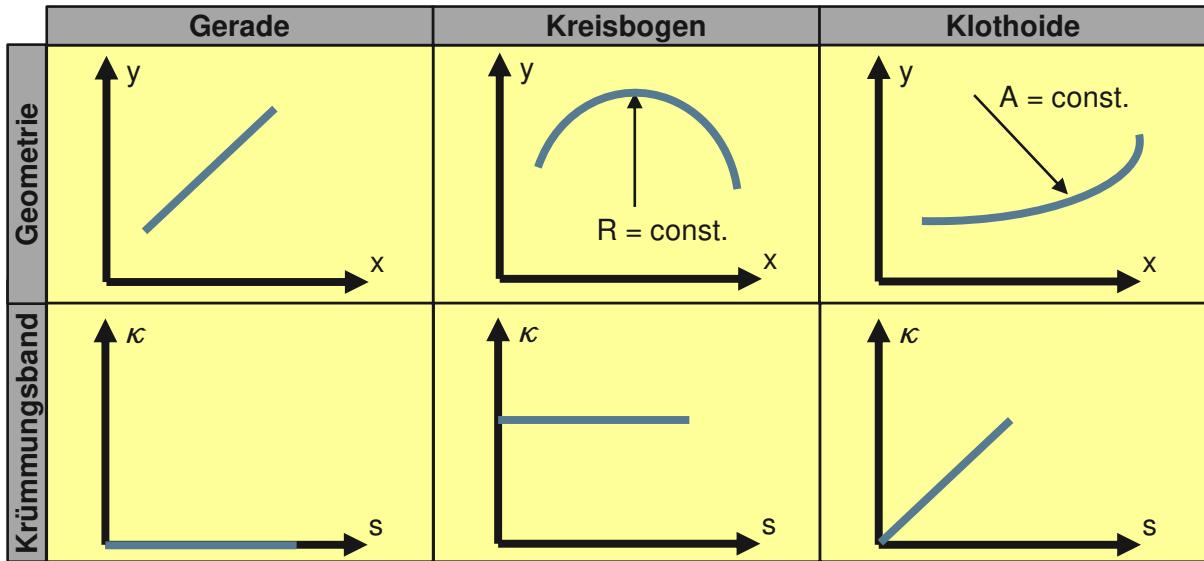


Abb. 2-9: Grundelemente der Trassierung

Die Kombinationsmöglichkeiten der drei Grundelemente der Trassierung sind begrenzt, sodass sich im Laufe der Jahre standardisierte Übergangsbögen etabliert haben. Die Übergangsbögen sind im Grunde Anwendungen der Klothoide. In Abb. 2-10 sind alle möglichen Übergangsbögen dargestellt, die zur Verbindung von Geraden und Kreisbögen notwendig sind. Das bedeutet, dass jedes kürzlich erbaute deutsche Straßennetz aus Geraden, Kreisbögen und den Übergangsbögen aus Abb. 2-10 besteht und keine weiteren Geometrien besitzt.

In der erste Spalte aus Abb. 2-10 ist der geometrische Verlauf und das Krümmungsband der Verbundkurve dargestellt. Diese besteht aus der Elementfolge Klothoide – Kreisbogen – Klothoide mit gleichgerichteter Krümmung. Grundsätzlich wird bei der Planung eine symmetrische Verbundkurve angestrebt, bei der die Klothoidenparameter  $A_1$  und  $A_2$  ungefähr gleich sind. Bei einer unsymmetrischen Verbundkurve ist das Klothoidenparameterverhältnis von  $A_1/A_2 \leq 1,5$  einzuhalten [WOL13, PIE00].

Die Scheitelklothoide stellt einen Sonderfall der Verbundkurve dar, siehe Abb. 2-10 zweite Spalte. Sie besteht aus zwei aneinanderstoßenden Klothoiden mit gleichgerichteter Krümmung. Zulässig ist dieser Sonderfall der Scheitelklothoide nur bei Richtungsänderungen von bis zu  $9^\circ$ , da die Aufeinanderfolge von zunehmender und abnehmender Krümmung fahrtechnisch anspruchsvoll ist [WOL13].

Zum Verbinden zweier gegensinnig gekrümmten Kreisbögen wird die Wendeklothoide genutzt, siehe Abb. 2-10 dritte Spalte. Die Wendeklothoide besteht aus zwei gegensinnig gekrümmten Klothoiden und sollte vorzugsweise symmetrisch ausgeführt werden. Für den unsymmetrischen Fall ist das gleiche Klothoidenparameterverhältnis wie für die Verbundkurve anzustreben. Falls nicht zu große Anforderungen an die Fahrdynamik gestellt werden sollen, besteht die Möglichkeit eine Zwischengerade zwischen die Klothoiden zu setzen.

Werden zwei Kreise verbunden, die sich nicht schneiden, ineinander liegen und nicht den gleichen Mittelpunkt haben, so wird das sich anschmiegende Klothoidenstück als Eilinie

bezeichnet. In Abb. 2-10 ist in der vierten Spalte durch die zwei schwarz gestrichelten Kreisbögen dargestellt, wie die Eiklohoide zwei gleichsinnig gekrümmte Kreisbögen miteinander verbindet [OST91, PIE00, WOL13].

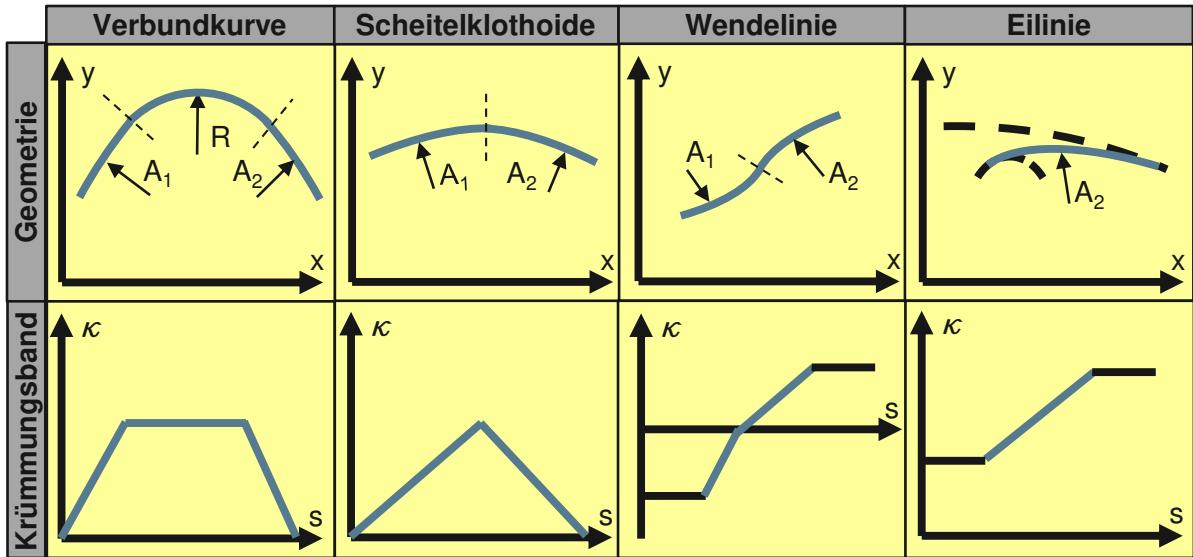


Abb. 2-10: Übergangsbögen der Trassierung

### 2.3.2.1.2 Tangentenmethode

Das erste Vorgehen zur Aufteilung der Freihandlinie in Trassierungselemente ist die Tangentenmethode. In Abb. 2-11 werden durch die Felder I-IV die einzelnen Schritte der Tangentenmethode dargestellt. Feld I stellt die Ausgangssituation dar, das heißt eine Freihandlinie mit weiß markierten Wendepunkten. Im nächsten Schritt wird ein Tangentenpolynom so über die Freihandlinie gelegt, dass dessen Seiten auf den Wendepunkten liegen. Das Tangentenpolynom ist in Feld II durch die blau gestrichelte Linie dargestellt. Anschließend werden die Tangentenschnittpunkte fixiert und die Richtungsänderungen durch rote Verbundkurven ausgerundet (siehe Feld III). Die Verbindungen zwischen den Verbundkurven werden durch Geraden realisiert. In Feld IV ist die ermittelte Trasse zur Verdeutlichung der Grundelemente farblich dargestellt. Dabei sind die Kreisbögen durch orange, die Klohoide durch grüne und die Geraden durch blaue durchgezogenen Linien dargestellt.

Die Tangentenmethode weiß gegenüber der in Kap. 2.3.2.1.3 vorgestellten Grundkreismethode eine weniger harmonische Linienführung auf, da die entstehenden Wendelinien mit Zwischengerade häufig aus Klohoide mit unterschiedlichen Parametern bestehen und somit eine relativ ungünstige Lenkbewegung verursachen [WOL13, PIE00].

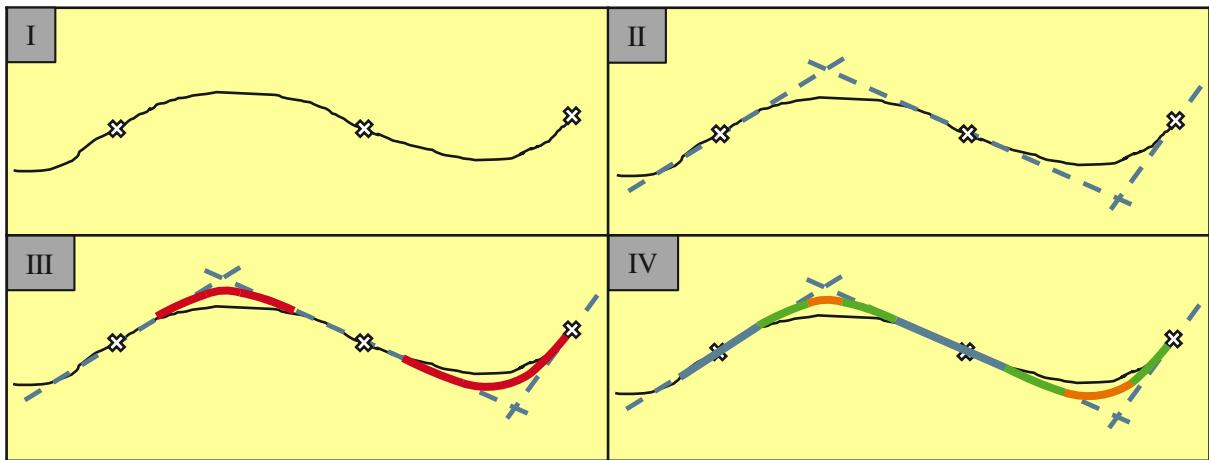


Abb. 2-11: Arbeitsschritte der Tangentenmethode

### 2.3.2.1.3 Grundkreismethode

Die Grundkreismethode ist die zweite Vorgehensweise zur Aufteilung der Freihandlinie in Trassierungselemente und wird schrittweise in den Feldern I-IV in Abb. 2-12 dargestellt. Feld I zeigt erneut die Ausgangssituation, die in Kap. 2.3.1 erarbeitet wird. Auf die Freihandlinie werden gegengekrümmte Kreisbögen gelegt, die diese bestmöglich abbilden. Dieser Zustand ist in Feld II durch rote Kreisbögen zu sehen, wobei die schwarzen Punkte die Mittelpunkte veranschaulichen. Anschließend werden die Kreisbögen durch Wendelinien verknüpft, siehe Feld III. Die Wendelinien sollen vorzugsweise symmetrisch ausgeführt und für die Klothoidenparameter runde Werte festgelegt werden. Dadurch ergibt sich ein iterativer Prozess, bei dem die Wendelinien und Kreisbögen im Wechsel angepasst werden, damit die Einhaltung der Vorgaben sichergestellt ist. In Feld IV sind die einzelnen Grundelemente der erstellten Kurve dargestellt, wobei Kreisbögen rot und die Spiralen in grün und orange dargestellt sind.

Insgesamt betrachtet weiß die Grundkreismethode gegenüber der Tangentenmethode aufgrund der geringeren Anzahl an Trassierungselementen eine harmonischere Linienführung auf und wird deshalb im Entwicklungsprozess bevorzugt [PIE00, WOL13].

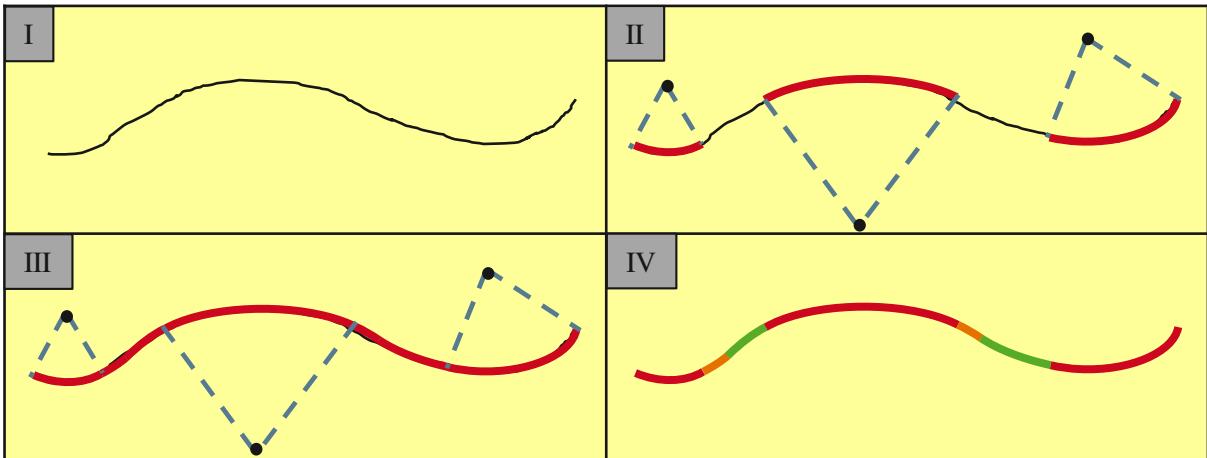


Abb. 2-12: Arbeitsschritte der Grundkreismethode

### 2.3.2.2 Berechnung der Baulänge

Im letzten Schritt des Vorentwurfs werden die Elemente der erstellten Trasse exakt festgelegt und an die entsprechenden Wertebereiche aus den Richtlinien angepasst.

Zunächst findet eine Einordnung der Straßen zu einer der Straßenkategorien statt, die in den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) definiert sind. Diesbezüglich gibt es die Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), die den Straßenkategorien eine der Entwurfsklassen EKA1-3 für Autobahnen zuordnet, und die Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), die EKL1-4 für Landstraßen definiert. Innerhalb dieser Entwurfsklassen sind Richtwerte und Wertebereiche für Planungsgeschwindigkeiten, Radien und Elementlängen zu finden [GER09, HAR13, BAI08, ROH08].

Durch die Zuweisung einer Straßenkategorie und somit der Definition einer Planungsgeschwindigkeit, werden die Entwurfsparameter auf definierte Bereiche festgelegt. Ist es aus geometrischer Betrachtung schwierig die vorgegebenen Bereiche für die Entwurfsparameter einzuhalten, so ist für diese Abschnitte eine Minderung der Planungsgeschwindigkeit vorzusehen. Mit Hilfe der ermittelten Radien wird das Verhältnis von Klothoidenparameter zum angrenzenden Radius des Kreisbogens  $A/R$  bestimmt. Dieses Verhältnis ist maßgebend für die Streckencharakteristik und beeinflusst die Verkehrssicherheit. Anzustreben ist bei der Bestimmung dieses Parameters die theoretische Möglichkeit, dass die gesamte Strecke bei unbehindertem freiem Verkehrsfluss und guten Wetterbedingungen durchgängig mit der Planungsgeschwindigkeit befahren werden kann. Neben den Richtwerten aus den Richtlinien gibt es zur Bestimmung des Klothoidenparameters allgemeingültige Grenzwerte. Da die Klothoide zu Beginn nur eine geringe Richtungsänderung bewirkt und somit optisch kaum in Erscheinung tritt, beträgt der kleinste Richtungsänderungswinkel  $\tau = 1,5^\circ$ . Aus diesem Mindestwinkel ergibt sich mit Gl. 2-11 und Gl. 2-15 folgende untere Grenze zu:

$$\tau = \frac{A^2}{2 \cdot R^2}$$

Gl. 2-23

$$\frac{A}{R} = \sqrt{2 \cdot \tau} = \frac{1}{3}$$

Die obere Beschränkung der Klohoide entsteht durch die Betrachtung, dass mit zunehmender Klohoidenlänge der Krümmungsradius so klein wird, dass Kraftfahrzeuge technisch nicht mehr in der Lage sind die Ideallinie zu halten und aus der Kurve getragen werden. Für diesen Fall wird in den Richtlinien für die Anlage von Straßen-Linienführung (RAS-L) ein maximaler Richtungsänderungswinkel von  $\tau = 28,62^\circ$  für die Klohoide zugelassen. Daraus ergibt sich durch einsetzen in Gl. 2-11 und Gl. 2-15 die obere Grenze zu:

$$\frac{A}{R} = \sqrt{2 \cdot \tau} = 1$$

Gl. 2-24

Zusammenfassend gilt es bei der Trassierung mit Klohoiden folgende Faustformel einzuhalten [DUR95]:

$$\frac{1}{3} \leq \frac{A}{R} \leq 1$$

Gl. 2-25

Die bisherigen Arbeitsschritte beziehen sich auf die Referenzlinie aus der Draufsicht. Bei der Berechnung der Baulänge werden Höhenunterschiede nicht betrachtet [LÖT01, WOL13, DUR95].

### 2.3.3 Detailentwurf

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Vervollständigung des Straßenlayouts. Ausgehend von der bisherigen zweidimensionalen Referenzlinie werden dieser Höhendaten zugewiesen, der Straßenquerschnitt definiert und ein Querneigungsverlauf erstellt. Besonders wird dabei auf die Vorgehensweisen und die notwendigen Parameter zur Erstellung des Detailentwurfs eingegangen. Die ermittelten Parameter müssen in der Benutzerschnittstelle zur Beschreibung virtueller Straßen definierbar sein, damit die Variabilität bei der Erstellung der Straße sichergestellt ist.

### 2.3.3.1 Aufstellen des Höhenplans

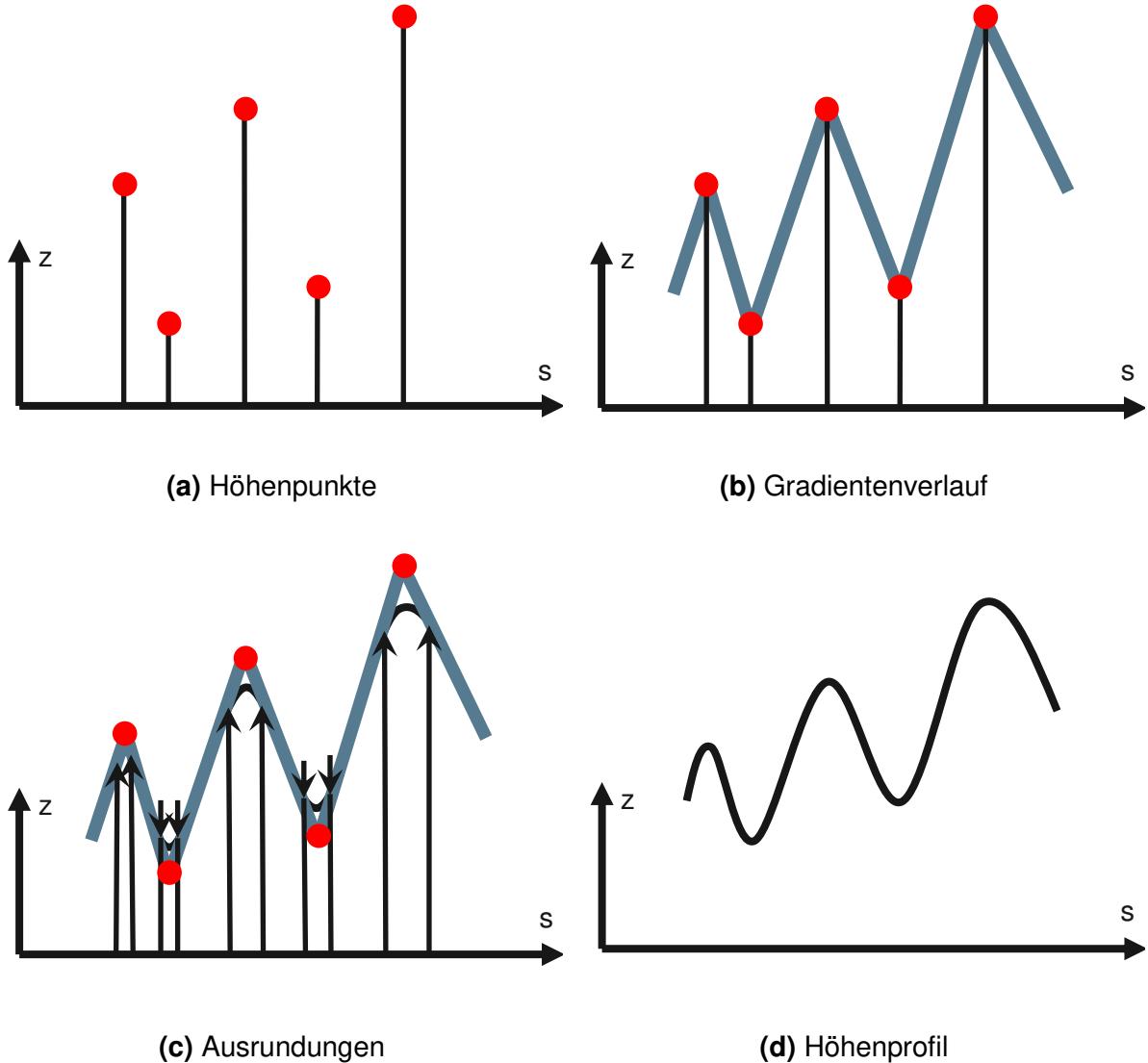


Abb. 2-13: Arbeitsschritte zur Erstellung eines Höhenplans

Anhand von Abb. 2-13 werden die einzelnen Arbeitsschritte zur Erstellung eines Höhenplans erläutert. Betrachtet wird ein Schnitt entlang der Referenzlinie, sodass die Bilder (a) bis (d) die sz-Ebene darstellen. Im ersten Schritt werden Höhenpunkte in Abhängigkeit der mitlaufenden s-Koordinate angegeben, siehe Bild (a). Anschließend wird durch Verbinden der aufeinanderfolgenden Punkte durch Gerade der in Bild (b) dargestellte Gradientenverlauf erzeugt. Der Verlauf des Höhenplans wird durch ausrunden der rot markierten Schnittpunkte durch Wannen und Kuppen erstellt. In Bild (c) wird der Beginn und das Ende der Ausrundung jeweils durch Pfeile markiert. Die bereits erstellten Geraden verknüpfen die Ausrundungen und ergeben somit den Höhenverlauf aus Bild (d).

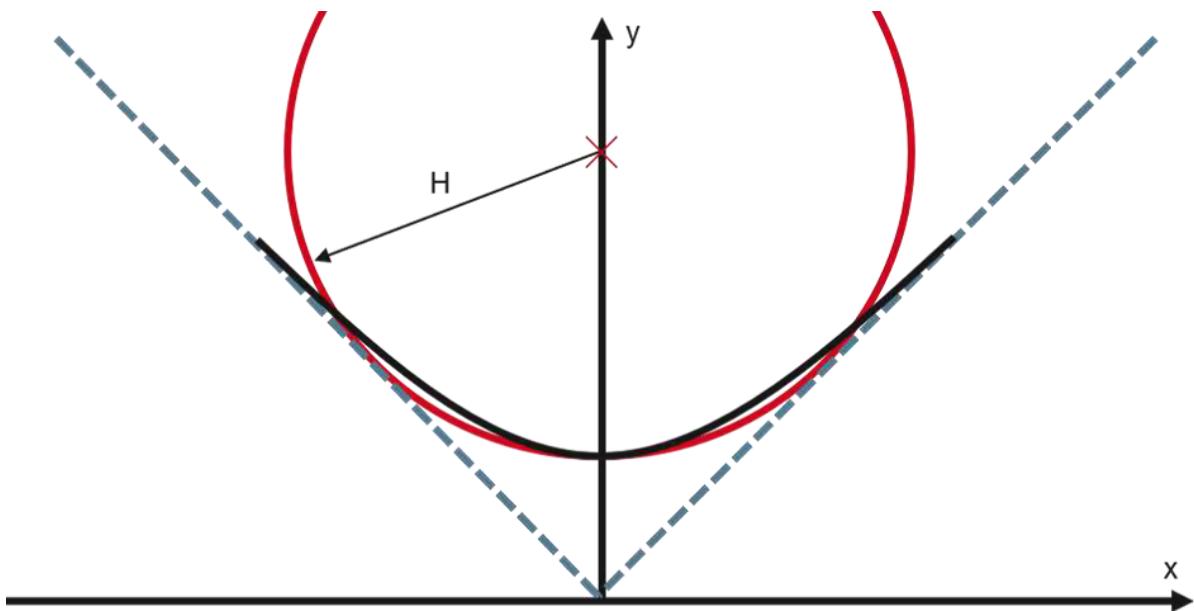


Abb. 2-14: Schematische Darstellung der Ausrundungen eines Kreisbogens und einer Parabel

Die Kuppen- und Wannenausrundungen erfolgen idealisiert durch Kreisbögen, da diese im betrachteten Bereich mit hinreichender Genauigkeit dem Verlauf von Parabeln gleichen. In Abb. 2-14 wird dieser Zusammenhang genauer betrachtet. Die blau gestrichelten Linien stellen die Geraden dar, die die Höhenpunkte verbinden und deren Schnittpunkt, der sich in Abb. 2-14 im Ursprung des Koordinatensystems befindet, ausgerundet werden soll. In rot ist die Ausrundung durch einen Kreisbogen und in schwarz die Ausrundung einer Parabel dargestellt. Zu sehen ist eine minimale geometrische Abweichung der beiden Verläufe, weshalb die idealisierte Annahme eines Kreisbogens damit gerechtfertigt ist. Wird also von einer Ausrundung mit dem Halbmesser  $H$  gesprochen, so ist damit der Radius des Schmiegekreises im Scheitelpunkt der Parabel gemeint.

Abhängig von der jeweiligen Straßenkategorie gibt es für Kuppen- und Wannenausrundungen Grenzwerte, die in den zugehörigen Richtlinien zu finden sind. Die Mindestwerte für Kuppenausrundungen werden durch erforderliche Haltesichtweiten bestimmt. Die Wannenausrundung ist ihrer Auslegung weniger problematisch, da sie eine gute Übersicht der Verkehrssituation ermöglicht. Diesbezüglich wird eine Anordnung von Knotenpunkten in der Wanne gegenüber der Kuppe präferiert.

Abhängig von der Straßenkategorie und der Entwurfsgeschwindigkeit gibt es in den Richtlinien auch Vorgaben für die maximale Längsneigung, die aufgrund der technischen Leistungsfähigkeit eines Kraftfahrzeugs begrenzt ist.

Bei der Erstellung des Raumplanes, also der Kombination von Höhen und Lageplan, sind weitere Richtlinien für die Entwurfsparameter einzuhalten. Auf Basis der dreidimensionalen Referenzlinie findet eine Analyse der Sichtweiten statt, sodass nach dessen Überprüfung die Halbdurchmesser für die Ausrundungen letztendlich festgelegt werden [WOL13, OST91, LÖT01, PIE00, HAR13, DUR95].

### 2.3.3.2 Bestimmung des Regelquerschnittes

Der Regelquerschnitt repräsentiert die sogenannte Straßenkrone. Diese besteht aus Fahrstreifen, Randstreifen, Seitenstreifen, Bankett, Mittelstreifen und Seitenwegen. Die genaue Festlegung des Regelquerschnittes findet nach den Richtlinien für die Anlage von Straßen-Querschnitt (RAS-Q) statt. Zusätzlich werden für die Auslegung Informationen zur Verkehrsbelastung und dem Schwerverkehrsanteil benötigt.

Bei der Kurvenfahrt eines Fahrzeugs beschreiben die Hinterräder eine Fahrspur mit kleinerem Bogenradius als die Vorderräder. Grund dafür sind die nicht vorhandenen bzw. minimalen Lenkwinkel der Hinterräder. Die Hinterräder erzeugen somit eine Schleppkurve, die dazu führt, dass die Fahrbahnbreite in einer Kurve größer werden muss als bei einer Geraden. Genaue Berechnungsmethoden zur Fahrstreifenverbreiterung sind in den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) zu finden. Zwingend erforderlich ist eine Fahrstreifenverbreiterung jedoch nur bei einbahnigen Straßen, da bei Mehrbahnen die Schleppkurve in die Nachbarfahrbahn ragen kann [WOL13, PIE00, LÖT01].

### 2.3.3.3 Querneigung und Verwindung

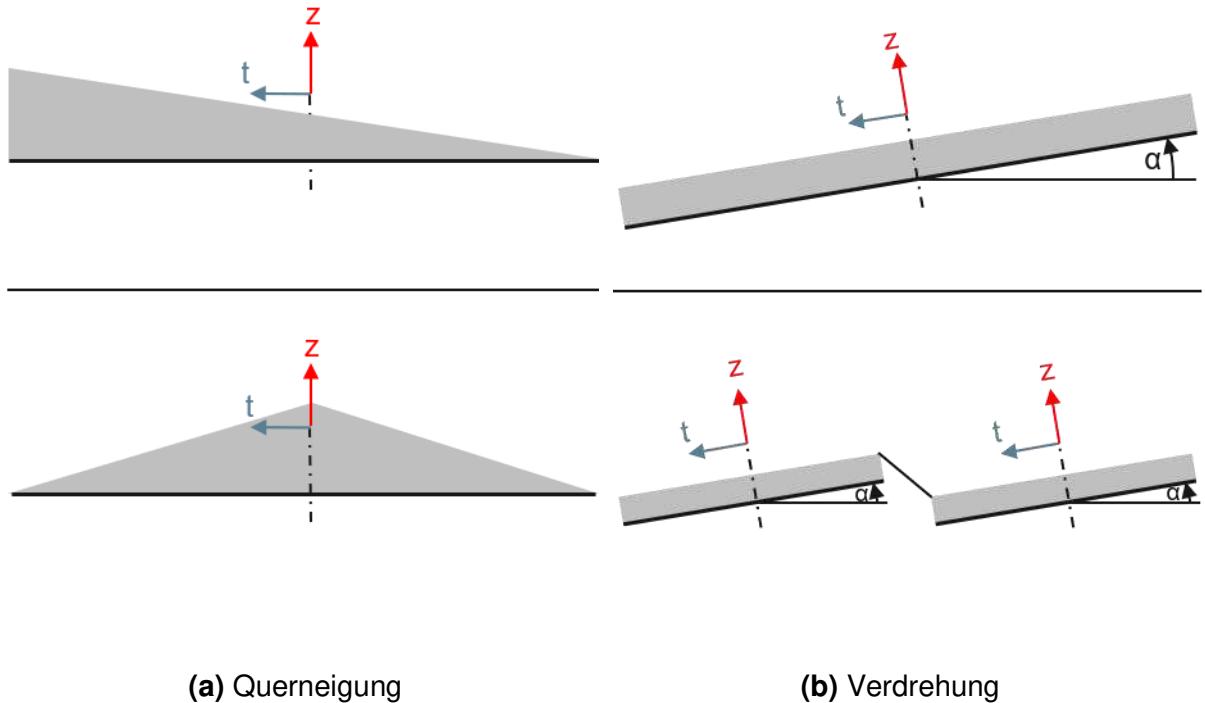


Abb. 2-15: Querneigung und Verdrehung

Die Querneigung einer Straße beschreibt die Neigung der Fahrbahnoberfläche in der tz-Ebenen. Hauptsächlich wird durch die Querneigung Flüssigkeit von der Fahrbahn geleitet, damit die Gefahren, die durch Aquaplaning oder Eisplattenbildung entstehen, vermieden

werden. Wegen dieser Funktion sind in der Realität fast immer leichte Querneigungen vorhanden. Es gibt grundsätzlich zwei Varianten zur Ausführung der Querneigung, siehe Abb. 2-15 Bild (a). Der obere Querschnitt aus Bild (a) zeigt die Einseitneigung, die abfallend von einem zum anderen Fahrbahnrand verläuft. Im unteren Teil von Bild (a) ist die Dachformneigung dargestellt, dessen Verlauf zum Fahrbahnrand beider Seiten abfallend ist. Die Wahl der Querneigungsform ist hauptsächlich von der Straßenkategorie und der Anzahl der Fahrstreifen abhängig, wobei das genaue Auswahlverfahren in der RAS-Q erläutert wird. Die Querneigung wird mit  $q$  bezeichnet und in Prozent angegeben. Grundsätzlich gibt es allgemeingültige Richtwerte, die eine minimale Querneigung von 2,5% und einen Maximalwert von 8% vorgeben [WOL13].

In einer Kurve ist die Querneigung stärker ausgeprägt als in einer Geraden. Der Grund ergibt sich aus der Fahrdynamik, da in einer Kurve die Fliehkraft am Fahrzeug angreift und zur Kurvenaußenseite wirkt. Um eine geplante Fahrtrajektorie halten zu können, wirkt die Seitenreibungskraft der Räder der Fliehkraft entgegen. Durch die Querneigung kann die Hangabtriebskraft unterstützend zur Seitenreibungskraft die Wirkung der Fliehkraft ausgleichen. Deshalb liegt eine Querneigung immer zur Kurveninnenseite vor und wird mit zunehmender Kurvenkrümmung vergrößert.

Die Betrachtung eines längeren Streckenabschnittes liefert die Notwendigkeit einer wechselnden Querneigung in Abhängigkeit der Krümmungsrichtung. Dieses Phänomen wird als Verwindung der Fahrbahnoberfläche bezeichnet. In Abb. 2-16 ist die Verwindung am Beispiel eines Krümmungswechsels dargestellt. Die Fahrbahn wird dabei gegenüber der Straßenachse verdreht und die Fahrbahnräder werden angerampt. Bei einbahnigen Straßen erfolgt die Drehung mit einem Winkel  $\alpha$  um die Fahrbahnachse, siehe Abb. 2-15 Bild (b) oben. Liegen mehrere Fahrstreifen vor, so wird um die Achsen der Richtungsfahrbahnen gedreht, siehe Bild (b) unten [DUR95, HAR13, WOL13, LÖT01, PIE00, OST91].

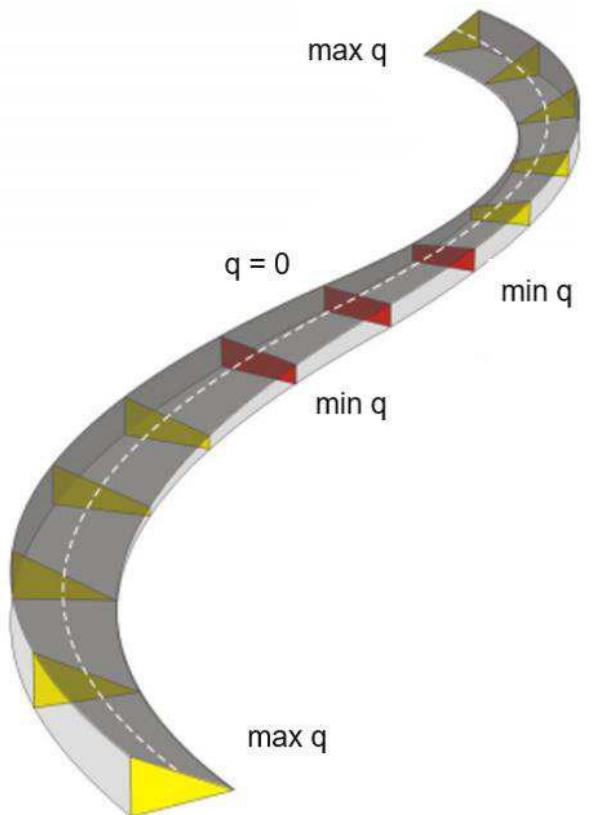


Abb. 2-16: Verwindung der Fahrbahnfläche bei einem Krümmungswechsel [RES19]

Um die entwurfstechnische Bearbeitung der Straße abzuschließen findet eine Analyse der Sichtweiten statt. Gute Sichtverhältnisse haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und die Sicherheit einer Straße. Es werden grundsätzlich drei Sichtweiten unterschieden, für die ein Nachweis zu leisten ist.

Im ersten Fall ist die Haltesichtweite nachzuweisen, die auf der gesamten Streckenlänge zu gelten hat. Sie beschreibt die Strecke, die ein Fahrzeug benötigt, um vor einem unerwartet auftretenden Hindernis auf der Fahrbahn zu halten. Abhängig von der Längsneigung der Straße und der Geschwindigkeit sind Grenzwerte für die Haltesichtweite einzuhalten, die in der RAS-L dargestellt sind.

Die Überholsichtweite beschreibt die Strecke, die der Fahrer einsehen muss, um einen Überholvorgang sicher abzuschließen. Die geschwindigkeitsabhängigen Werte sind der RAS-L zu entnehmen.

Weiterhin gibt es die Sichtweiten an Knotenpunkten, die vorgeben ein gewisses Sichtfeld freizuhalten. Diese Sichtfeld gestattet dem Fahrer kreuzende oder abbiegende Fahrer, Radfahrer oder Fußgänger rechtzeitig zu erkennen und anzuhalten [PIE00, LÖT01, WOL13, DUR95].

## 2.4 Abstraktionsebenen von Szenarien

Auf Basis der Norm ISO 26262, die von einer funktional sicheren Entwicklung von sicherheitsrelevanten elektrischen/elektronischen Systemen in Kraftfahrzeugen handelt,

haben Bagschik et al. Abstraktionsebenen für Szenarien definiert. Die einzelnen Ebenen funktionaler, logischer und konkreter Szenarien sind in Abb. 2-17 dargestellt. Für jede Ebene sind beispielhafte Beschreibungen angegeben, die in die Untergruppen Basisstrecke, stationäre und bewegliche Objekte und die Umwelt unterteilt sind. Anhand der blauen Dreiecke ist zu erkennen, dass funktionale Szenarien das größte Abstraktionslevel besitzen und dieses über logische Szenarien bis hin zu Konkreten immer weiter abnimmt. Die Szenarienanzahl hingegen ist für Beschreibungen auf funktionaler Ebene gering und nimmt zur konkreten Beschreibung stetig zu.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Unterteilung in die einzelnen Abstraktionsebenen der Szenarien auf die Betrachtung der Basisstrecke fokussiert, da die Definitionen zur Klassifikation von Szenarien analog auf Strecken übertragen werden können. Des Weiteren liegt der Fokus der Arbeit auf der Umweltmodellierung, sodass zwischen funktionalen, logischen und konkreten Strecken differenziert wird.

### Funktionale Strecken:

Die abstrakte Beschreibung von Strecken stellt die Ebene der funktionalen Strecken dar. Die Darstellung basiert auf einer sprachlichen Beschreibung, die intuitiv lesbar ist und das Expertenwissen direkt abbildet. Dafür muss ein einheitliches Vokabular definiert werden, dass für den Anwendungsfall spezifisch ist und unterschiedlichste Detailierungsgrade besitzt. Der Detailierungsgrad wird durch das Vokabular beeinflusst, denn je umfangreicher das Vokabular, desto höher die Variationsmöglichkeit bei der Straßenerstellung. Dabei ist wichtig, dass die Beschreibung widerspruchsfrei ist und die Begriffe des Vokabulars eindeutig voneinander getrennt werden können. In Abb. 2-17 ist im blauen Kasten unter dem Reiter „Basisstrecke“ ein Beispiel einer funktionalen Streckenbeschreibung zu finden.

### Logische Strecken:

Ein höherer Detailierungsgrad wird durch die Ebene der logischen Strecken erreicht. Dabei wird das Vokabular zur Beschreibung funktionaler Strecken parametrisiert. Den einzelnen Parametern werden Wertebereiche zugeordnet und durch die Zuweisung statistischer Verteilungen spezifiziert. Des Weiteren können bestimmten Parametern Beziehungen zueinander vergeben werden. Diese können zum einen Korrelationen verkörpern, wie beispielsweise der Kurvenradius in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Zum anderen sind numerische Bedingungen, die zum Beispiel ausschließen, dass ein Spielstraßenschild auf der Autobahn platziert werden kann, möglich. Ein Beispiel für eine logische Streckenbeschreibung ist in Abb. 2-17 im rosenen Kasten unter dem Punkt „Basisstrecke“ dargestellt. Das Ziel logischer Strecken ist, die Datengrundlage für bestimmte Testspezifikationen bereitzustellen.

### Konkrete Strecken:

Die Ebene der konkreten Strecken nutzt zur Beschreibung eindeutige Parameter. Logische Strecken werden durch Konkretisierung der Parameterbereiche in konkrete Strecken überführt. Durch infinitesimale Abtastung und Kombination verschiedener Parameter einer logischen Strecke lassen sich unzählige konkrete Strecken abbilden. Die logischen Strecken sind somit eine Anhäufung der Parameterverteilungen von konkreten Strecken. Für einen

expliziten Testfall sind konkrete Strecken immer notwendig, da lediglich diese eindeutig abgebildet werden können. In Abb. 2-17 ist analog zu den anderen beiden Ebenen im grünen Kasten beispielhaft eine konkrete Strecke definiert [BAG18, BAG17, ECK17, MEN17].

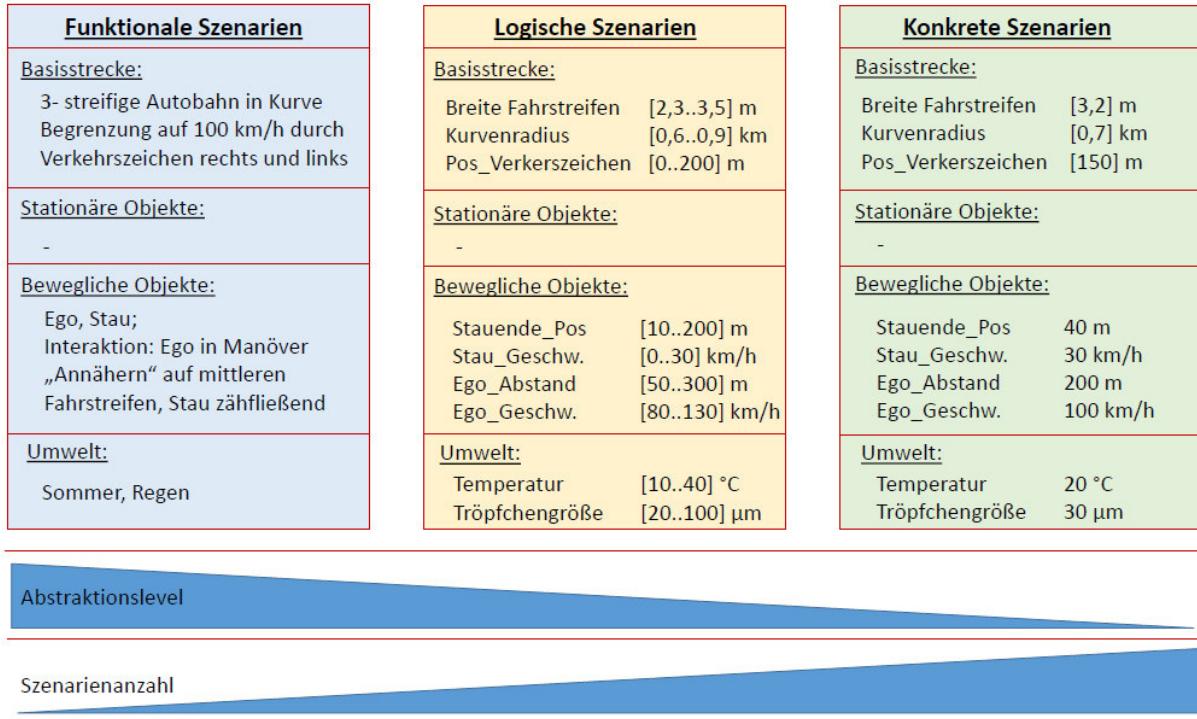


Abb. 2-17: Abstraktionsebenen von Szenarien mit zugehörigen Beispielen [BAG17]

## 2.5 OpenDRIVE

Die OpenDRIVE-Initiative wurde 2005 von der VIRES Simulationstechnologie GmbH und DaimlerChrysler Driving Simulator ins Leben gerufen. OpenDRIVE ist ein standardisiertes offenes Dateiformat zur Beschreibung von spurbasierten Straßennetzwerken. Die erste Veröffentlichung der OpenDRIVE-Datei erfolgte im Jahre 2005. Die Beschreibung in dieser Datei erfolgt mit der Syntax der Extensible Markup Language (XML). Es werden alle stationären sowie quasi-stationären Elemente des Umweltmodells wie Straßenverläufe, Verkehrssignale und Verkehrsobjekte beschrieben. Die dynamischen Anteile des Umweltmodells, die beispielsweise die Umfeldverkehrsteilnehmer umfassen, werden in OpenDRIVE nicht dargestellt. Die OpenDRIVE-Datei ist so strukturiert, dass sie unter Beachtung der Gestaltungsrichtlinien beliebig erweiterbar und veränderbar ist. Dadurch sind verschiedenste Spezialisierungsgrade möglich und die Erstellung jedes Straßennetzwerkes erlaubt. Ziel dieses standardisierten Dateiformats zur Beschreibung des Umweltmodells ist, der flexible Datenaustausch zwischen den verschiedenen Anwendungsbereichen. Um alle relevanten Aspekte und Interessen zu beachten, schlossen sich 2006 mehrere Unternehmen zu einer OpenDRIVE-Community zusammen. Diese Community befasst sich mit der Verwaltung des Dateiformats und besteht aus verschiedenen OEMs, Forschungseinrichtungen und Zulieferern, die in der Simulationsindustrie tätig sind. Im

Folgenden wird der Aufbau und die Struktur von OpenDRIVE genauer erläutert, da auch in dieser Arbeit das Dateiformat als allgemeine Beschreibungsform der statischen Umwelt genutzt wird. Für eine vollständige Beschreibung wird auf die Gestaltungsrichtlinien von OpenDRIVE verwiesen [DUP15, DUP06].

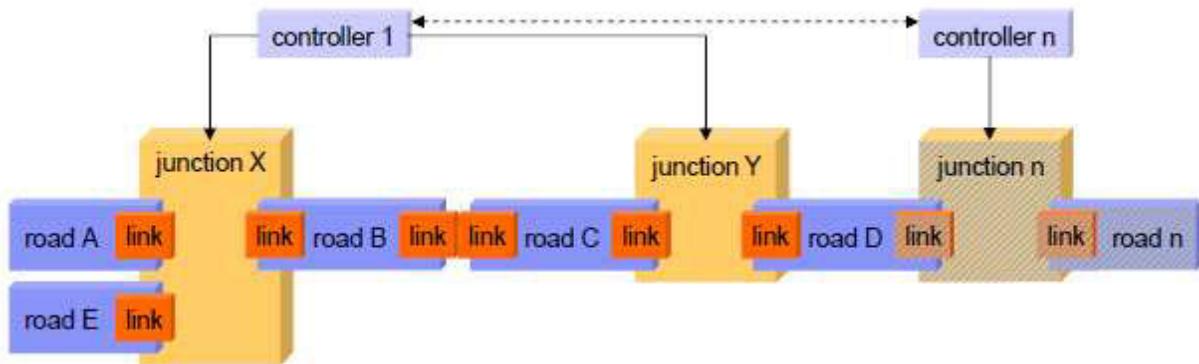


Abb. 2-18: Grundstruktur von OpenDRIVE [DUP06]

In Abb. 2-18 ist die Grundstruktur von OpenDRIVE dargestellt. Grundsätzlich besteht nach diesem Dateiformat jedes Straßennetz aus Straßen (engl. road), Kreuzungen (engl. junction) und Steuerungseinheiten (engl. controller). Jede Straße besitzt an ihrem Anfangs- und Endpunkt eine Verbindungsstelle, sodass jeder Straße ein Vorgänger und ein Nachfolger zugeordnet werden kann. Diese Verbindungen (engl. link) können entweder zu anderen Straßen oder zu Kreuzungen erzeugt werden.

In OpenDRIVE werden zwei Koordinatensysteme genutzt. Das Erste ist das globale kartesische xyz-Koordinatensystem, bei dem die x-Achse nach Osten, die y-Achse nach Norden und die z-Achse nach der Rechten-Hand-Regel nach oben zeigt. Das zweite Koordinatensystem ist das mitbewegte stz-Koordinatensystem. Dabei zeigt die s-Achse immer in Richtung des positiv zunehmenden Verlaufs der Referenzlinie und die t-Achse orthogonal dazu nach links. Auch hier lässt sich die z-Achse über die Rechte-Hand-Regel bestimmen [DUP19, DUP06].

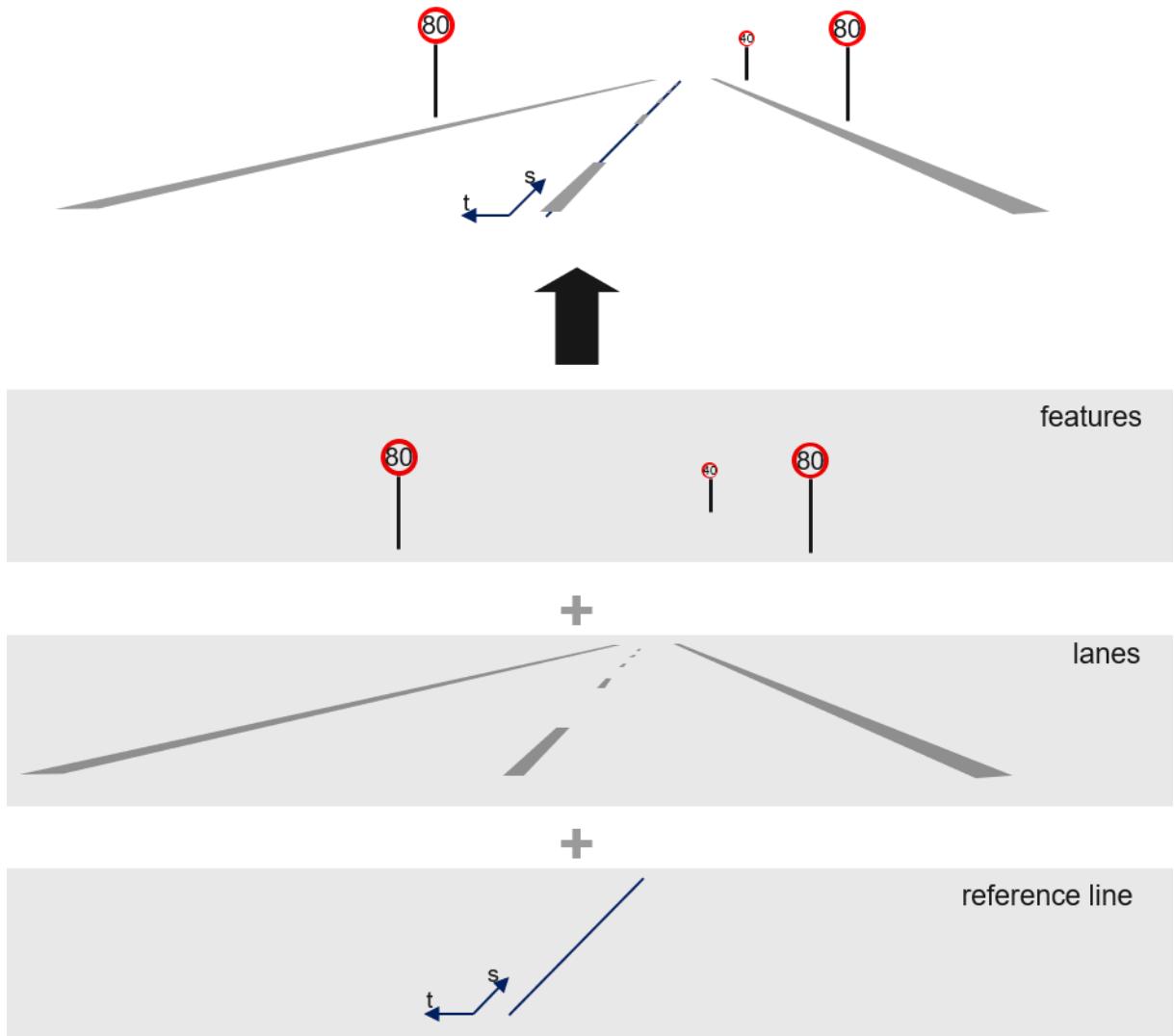


Abb. 2-19: Erstellungsstufen einer Straße in OpenDRIVE [DUP19]

Eine Straße besteht nach dem Modell von OpenDRIVE aus einer Referenzlinie (engl. reference line), einem Höhenprofil, einem Querprofil, Fahrspuren (engl. lanes) und Elementen der Verkehrsumgebung (engl. features) wie Verkehrssignalen und -objekten.

In Abb. 2-19 sind die einzelnen Erstellungsstufen einer Straße, ohne Höhen- und Querprofil, dargestellt. Für jede Straße wird in der untersten Ebene zunächst die Referenzlinie erzeugt. Diese besitzt ein eigenes mitbewegtes Koordinatensystem und setzt sich genau wie im realen Straßenbau hauptsächlich aus den drei Grundelementen der Trassierung zusammen. In Abb. 2-20 ist eine beispielhafte Kombination der Elemente Linie, Spirale und Kreisbogen dargestellt. Des Weiteren ist die Anordnung der Koordinatensysteme zueinander am Beispiel der Referenzlinie zu sehen. Die Referenzlinie besitzt das mitbewegte stz-Koordinatensystem,

ist allerdings beliebig zu dem globalen xyz-Koordinatensystem positioniert.

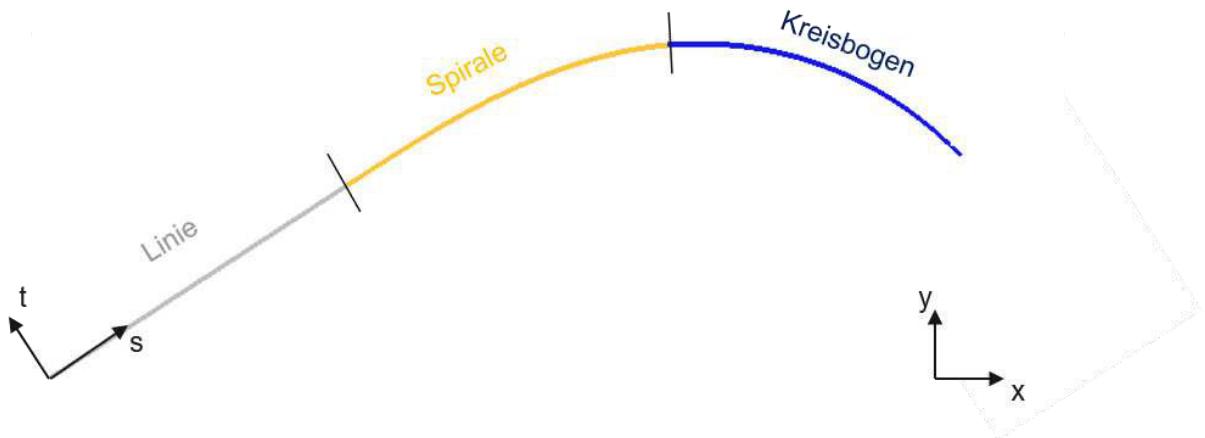


Abb. 2-20: Verlauf einer Referenzlinie in OpenDRIVE in Abhängigkeit von ihrer Position zu den Koordinatensystemen [DUP19]

In der zweiten Ebene aus Abb. 2-19 werden zu beiden Seiten der Referenzlinie Fahrbahnen hinzugefügt. Diese Fahrbahnen umfassen unter anderem Fahrstreifen, Seitenstreifen, Gehwege und Fahrradwege. Eine Straße kann in Straßenabschnitte eingeteilt werden. Innerhalb dieser Straßenabschnitte ist die Anzahl der Fahrbahnen konstant. Liegt eine Fahrbahnaufweitung oder -verengung vor, so findet diese innerhalb eines Streckenabschnittes statt. Der Verlauf der Außenkante der Spurbreitenänderung wird über ein Polynom dritten Grades beschrieben.

In der dritten Erstellungsstufe einer Straße werden die Elemente der Verkehrsumgebung definiert. Diese werden für jede Straße einzeln angegeben. Die Positionierung findet in Abhängigkeit vom Startpunkt der Referenzlinie statt, d.h. vom Ursprung des mitbewegten Koordinatensystems. Mit einem Abstandswert in jede Koordinatenrichtung, einem Rotationswinkel um dessen Achsen und einer Orientierungsangabe können diese Elemente eindeutig auf der Straße platziert werden. Diese Elemente können zum einen Signale, wie Verkehrsschilder, Lichtsignalanlagen oder Markierungen sein, die über eine genormte Zeichennummer angegeben werden. Zum anderen umfassen die Elemente der Verkehrsumgebung Tunnel, Brücken, Parkflächen, Bushalteställen, Sondermarkierungen oder Verkehrsinseln.

Das Zusammenführen der drei Ebenen führt zu der in Abb. 2-19 oben dargestellten Straße. Diese zeigt einen zweidimensionalen Verlauf in der st-Ebene.

Um eine Straße im Raum darzustellen werden zusätzlich Informationen zum Höhen- und Querprofil benötigt. Das Höhenprofil beschreibt den Verlauf der Straße in der sz-Ebene des mitbewegten Koordinatensystems. Die Angabe dieses Verlaufs wird durch ein kubisches Polynom beschrieben, welches als Variable die Laufkoordinate s besitzt.

Das Querprofil wird ähnlich zum Höhenprofil durch ein Polynom dritten Grades beschrieben, allerdings wird der Verlauf in t-Richtung des Koordinatensystems betrachtet. Ähnlich zur Verwindung im realen Straßenbau wird die Verwindung in OpenDRIVE durch eine Änderung des Querneigungswinkels, also dem Rollwinkel um die s-Achse angegeben. Die Änderung

dieses Winkels wird auch durch ein kubisches Polynom in Abhängigkeit von der Laufkoordinate  $s$  definiert [VIR19b, DUP19].

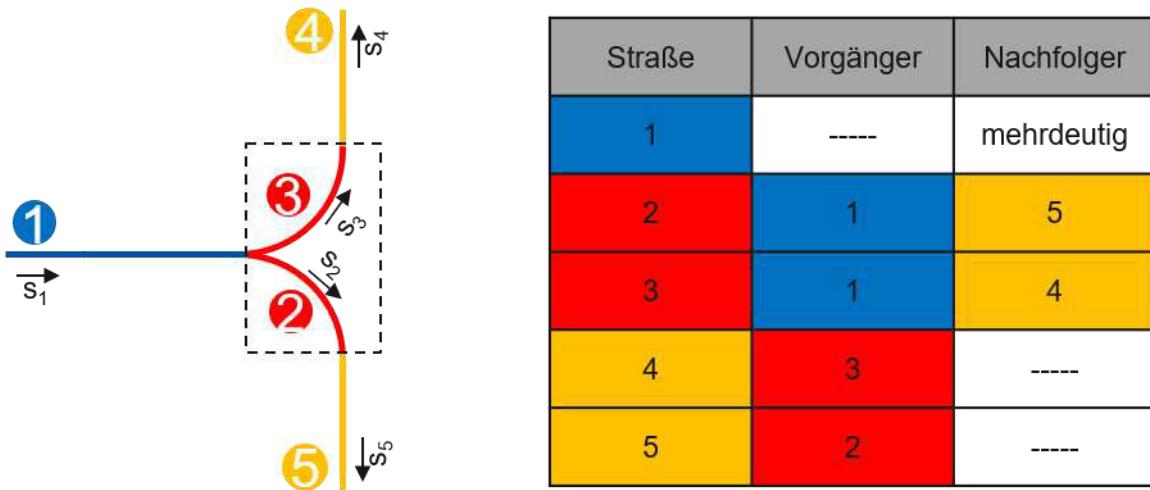


Abb. 2-21: Darstellung einer T-Kreuzung in OpenDRIVE

Besitzt eine Straße mehr als einen Nachfolger oder Vorgänger, so wird diese Verbindung in OpenDRIVE als Kreuzung definiert. Eine Kreuzung beschreibt nach diesem Modell alle möglichen Verknüpfungszustände bei mehrdeutigen Verbindungen und enthält keine Informationen über den Aufbau oder die Lage der Straßen. In Abb. 2-21 wird genauer erläutert, welche Verknüpfungen in einer T-Kreuzung vorliegen. Die blaue Straße mit der Nummer „1“ und die gelben Straßen mit den Nummern „4“ und „5“ sind Straßen, die in den schwarz gestrichelten Kreuzungsbereich münden. Die roten Straßen mit den Nummern „2“ und „3“ werden als Verbindungsstraßen bezeichnet. In der Tabelle der Abbildung werden zu jeder Straße die Vorgänger und Nachfolger angegeben. Die erste Zeile bedeutet, dass die erste Straße keinen Vorgänger besitzt, allerdings mehr als einen Nachfolger hat. Diesbezüglich werden die einzelnen Verknüpfungen in der zweiten und dritten Zeile dargestellt. Dieser sind zu entnehmen, dass sowohl die zweite als auch die dritte Straße die Erste als Vorgänger besitzen. Durch diese Angabe sind die Verknüpfungen für die Nachfolger der ersten Straße genau definiert. Die weiteren Tabelleneinträge können analog dazu interpretiert werden.

Sind die Vorfahrtsregeln einer Kreuzung nicht anhand der Verkehrsschilder oder der Lichtsignalanlagen abzusehen, so werden jeweils zwei Verbindungsstraßen gegeneinander priorisiert. Des Weiteren ist in Abb. 2-18 zu sehen, dass eine Steuerungseinheit einer oder mehrerer Kreuzungen zugeordnet wird und auch mit anderen Steuerungseinheiten in Verbindung steht. Eine Steuerungseinheit besteht aus einer Gruppe von digitalen Signalen, die sowohl Lichtsignalanlagen als auch digitale Verkehrsschilder beinhalten. Digitale Signale mit gleichen Schaltungsintervallen werden in Gruppen zusammengefasst, sodass beispielsweise Lichtsignalanlagen einer Kreuzung über diese Schnittstelle angesprochen werden können. Somit stellt die Steuerungseinheit konsistente Zustände für eine Gruppe von Signalen bereit [DUP19, DUP06, VIR19b].

### 3 Forschungsbedarf und Forschungsansatz

In diesem Kapitel wird nach der Vorstellung aktueller Systeme zur Erstellung virtueller Straßen der Forschungsbedarf ermittelt. Anschließend folgt anhand des Campus-Boulevard in Aachen die Analyse eines realen Straßennetzes. Dabei werden besondere Merkmale sowie Grundbestandteile repräsentativ für alle Straßennetze herausgearbeitet. Auf Basis dieser Erkenntnis wird die Forschungsfrage konkretisiert und ein Forschungsansatz erarbeitet.

#### 3.1 Analyse aktueller Systeme und Ableiten der Forschungsbedarfs

Zur Erstellung virtueller Straßen gibt es in der Industrie grundsätzlich zwei verschiedene Vorgehensweisen. In der ersten Variante werden die Straßen anhand von aufgenommenen Realdaten konstruiert. Dafür sind Testfahrten nötig, während derer Sensoren und Kameras den Straßenverlauf durch eine Menge von Punkten aufzeichnen. Die aufgenommenen Punkte werden anschließend zu einer Kurve verbunden, wobei jeweils zwischen zwei Punkten Geraden oder Polynome gefittet werden. Die erstellten Geometrien entsprechen allerdings nicht unbedingt den realen Trassierungselementen aus Kap. 2.3.2.1.1, was die Realitätsnähe dieser Systeme widerspiegelt. Ein weiterer Nachteil dieser Methode sind die erforderlichen Testfahrten zur Aufnahme der Daten. Beispiele solcher Systeme sind OpenStreetMap und Road2Simulation.

Die zweite Variante basiert auf der manuellen Erstellung eines Straßenverlaufs mit einer graphischen Oberfläche. Dabei können beliebige Straßen flexibel im Raum platziert werden. Auf Grundlage realer Hintergrundbilder können diese Straßen nachgebaut und anschließend bearbeitet werden. Die Erstellung der Straßenverläufe benötigt allerdings einen Anwender, sodass der Grad der Automatisierung sehr gering ist. Beispiele solcher Systeme sind Road Designer (VIRES Simulationstechnologie GmbH), CarMaker (IPG Automotive), PreScan (TASS), PTV Vissim (PTV AG) und Automatic Simulation Models (dSPACE).

Die aktuellen Systeme zur Erstellung virtueller Straßen lassen sich bisher nur schwer automatisieren. Der Aufwand, der zur Erstellung eines Straßennetzes erbracht wird, sollte nicht nur individuell für den behandelten Fall genutzt werden können. Einmalig erstellte Teile eines Straßennetzes sollten als variable Bausteine für den nächsten Anwendungsfall dienen. Abhängig vom Anwendungsfall ist die exakte Angabe einiger Parameter gegebenenfalls irrelevant, sodass vordefinierte Standartwerte den Arbeitsaufwand verringern würden. Beispielsweise ist die exakte Angabe der Spurbreite und der Fahrbahnmarkierungen für das testen eines ACC-Systems nicht von Bedeutung. Des Weiteren ist das Generieren zufälliger Straßennetze durch die aktuellen Systeme so nicht möglich.

Im Rahmen der Arbeit gilt es somit, ein Tool zu entwickeln, welches die zuvor genannten Anforderungen erfüllt. Der Output des Tools ist vorab durch das OpenDRIVE-Format aus Kap. 2.5 vorgegeben. Die Notwendigkeit eines Tools zur Erstellung von OpenDRIVE-Dateien ergibt sich aus der spezifischen Syntax. Schwierigkeiten entstehen bei der Erstellung aufgrund der schlechten Übersichtlichkeit und der aufwendigen redundanten Angabe von Parametern.

Außerdem ist die Erstellung nicht intuitiv möglich, da für die vollständige Parametrisierung der Straßen Hilfsmittel und Berechnungsverfahren nötig sind.

### 3.2 Analyse zum Aufbau eines realen Straßennetzes

Zunächst findet die Analyse eines realen Straßennetzes statt, um besondere Merkmale, immer wiederkehrende Elemente und markante oder offensichtliche Eigenschaften herauszufiltern. Am Beispiel des in Abb. 3-1 und Abb. 3-4 dargestellten Luftbildes des Campus-Boulevards im Stadtteil Melaten in Aachen wird diese Analyse durchgeführt.

Im ersten Schritt der Analyse werden die wesentlichen Segmente ermittelt, aus denen ein reales Straßennetz zusammengesetzt ist. Besonders auffällig sind die Knotenpunkte. In Abb. 3-1 werden die Knotenpunkte durch verschiedenfarbige Rahmen markiert. Dargestellt ist ein Kreisverkehr durch einen roten Rahmen, eine 4-Wege-Kreuzung durch einen grünen Rahmen, drei 3-Wege-Kreuzungen durch blaue Rahmen und fünf Einmündungen durch gelbe Rahmen. Eine Einmündung ist eine spezielle Form der 3-Wege-Kreuzung, bei der es nur eine Straßenfortsetzung gibt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird auf die Differenzierung zwischen einer Einmündung und einer 3-Wege-Kreuzung verzichtet und stattdessen beides unter dem Begriff der T-Kreuzung zusammengefasst. Die Unterschiede einer Einmündung gegenüber einer 3-Wege-Kreuzung sind ein geringeres Verkehrseinkommen und eine geringere Geschwindigkeit, sodass eine eindeutige Differenzierung dieser Kreuzungstypen keinen relevanten Einfluss auf den Entwurf der Straße hat. Die 4-Wege-Kreuzung ist auch als X-Kreuzung bekannt und wird im weiteren Verlauf so bezeichnet.

Die einzelnen Knotenpunkte werden durch Verbindungsstraßen verknüpft, die in Abb. 3-1 durch schwarze Linien dargestellt sind.

Zusammenfassend besteht das vorliegende Straßennetz aus den folgenden Segmenten: Verbindungsstraße, Kreisverkehr, X-Kreuzung und T-Kreuzung. Dabei dienen die Verbindungsstraßen dazu eine Strecke zu überbrücken und so zwei Punkte zu verbinden. Durch die Knotenpunkte entsteht das Straßennetz, da die einzelnen Straßen verknüpft werden und so das Erreichen verschiedener Zielpunkte effizient möglich ist.

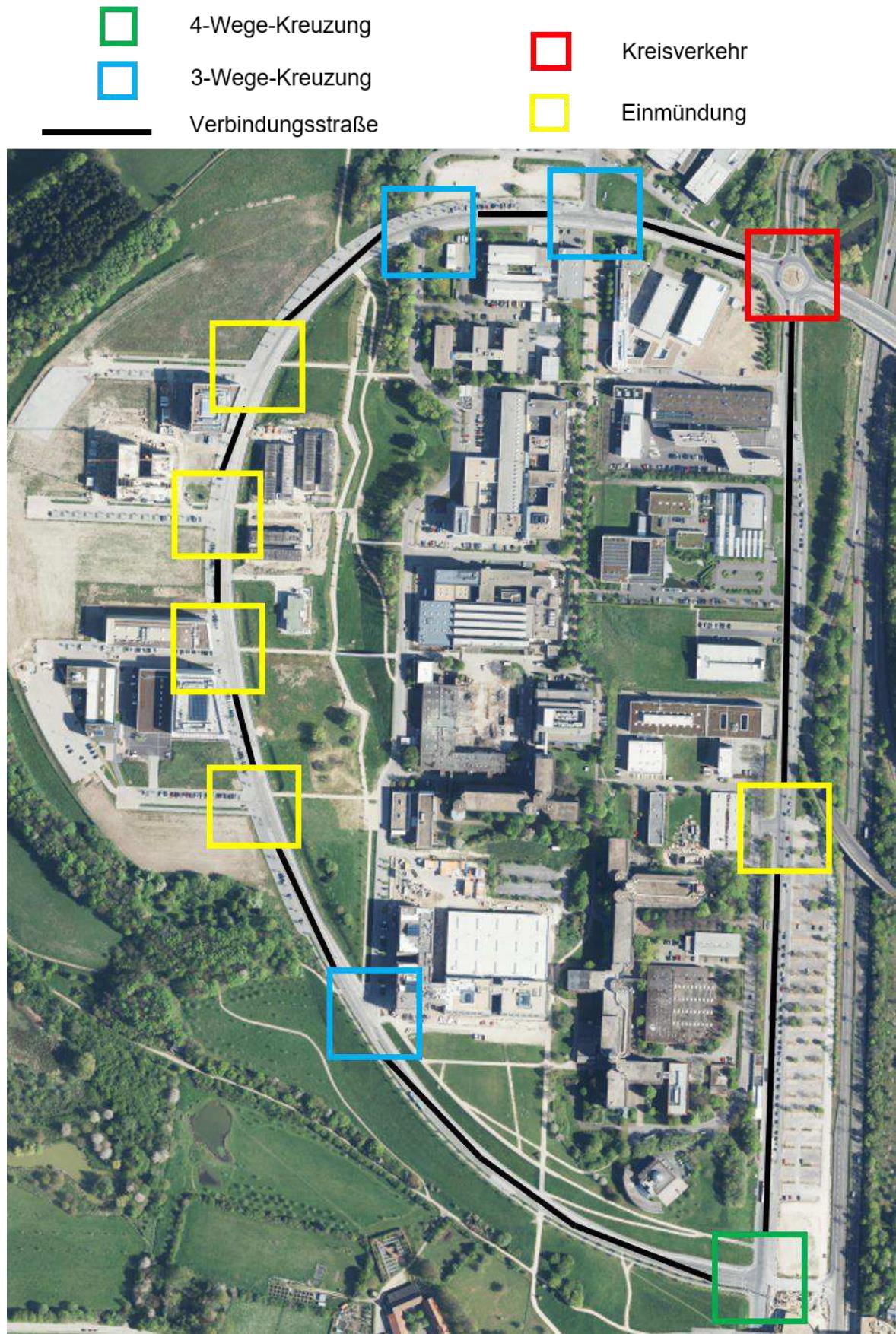


Abb. 3-1: Einteilung eines Straßennetzes in Segmente am Beispiel des Campus-Boulevard

Eine detaillierte Analyse des Aufbaus der einzelnen Segmente gibt Aufschluss über wiederkehrende Elemente (auch Features genannt), die für den Zusammenbau notwendig sind. In Abb. 3-3 ist die Zerlegung schrittweise für die drei Segmente Kreisverkehr, T-Kreuzung und X-Kreuzung dargestellt. In der ersten Spalte der Abbildung sind Ausschnitte vom Luftbild des Campus-Boulevard zu sehen. Die zweite Spalte enthält den schematischen Aufbau der Segmente. Dafür ist für jede mögliche Fahrspur ein Richtungspfeil eingetragen. Die gestrichelten Linien entsprechen dabei der Möglichkeit einer Fahrbahnaufweitung für eine Linksabbiegerspur. Anhand der schematischen Darstellung sind die wesentlichen Elemente für den geometrischen Entwurf eines Segmentes sichtbar. In der letzten Spalte der Abbildung werden die Features für das jeweilige Segment hervorgehoben. Zu erkennen ist, dass alle Segmente aus denselben sich wiederholenden Features bestehen. Durch Kombination der Features lassen sich somit alle beliebigen Segmente zusammenbauen. In Abb. 3-2 sind alle Features dargestellt, um jegliche Art von Segmenten zu kreieren. Die Features können dabei wie Bausteine in beliebiger Anzahl und Anordnung aneinandergesetzt werden. In der ersten Spalte der Abbildung ist die geometrische Verbindung als erstes Feature aufgelistet. Sie beschreibt die Verbindung zweier Punkte im Raum und kann aus beliebigen Geometrien zusammengesetzt werden. Eine Straße besteht somit aus zusammengesetzten geometrischen Verbindungen. In der zweiten und dritten Spalte sind die Fahrbahnverengung und Fahrbahnaufweitung dargestellt. Mit diesen Features kann die Anzahl der Fahrstreifen verändert werden. Als letztes notwendiges Feature zur Erstellung der Segmente gibt es die Schnittstelle. Die Schnittstelle stellt die Verknüpfung zwischen sich kreuzenden Straßen dar. Durch dieses Feature werden alle möglichen Verbindungsstraßen (Links- und Rechtsabbieger in beide Fahrrichtungen) beschrieben, die durch sich kreuzende Straßen entstehen. So besteht eine T-Kreuzung, wie in Abb. 3-3, aus zwei Straßen, die jeweils zwei geometrische Verbindungen besitzen und aus einer Schnittstelle, die die beiden Straßen verbindet.

Geometrische Verbindung	Fahrbahn-verengung	Fahrbahn-aufweitung	Schnittstelle

Abb. 3-2: Auflistung aller Features für die Erstellung von Segmenten

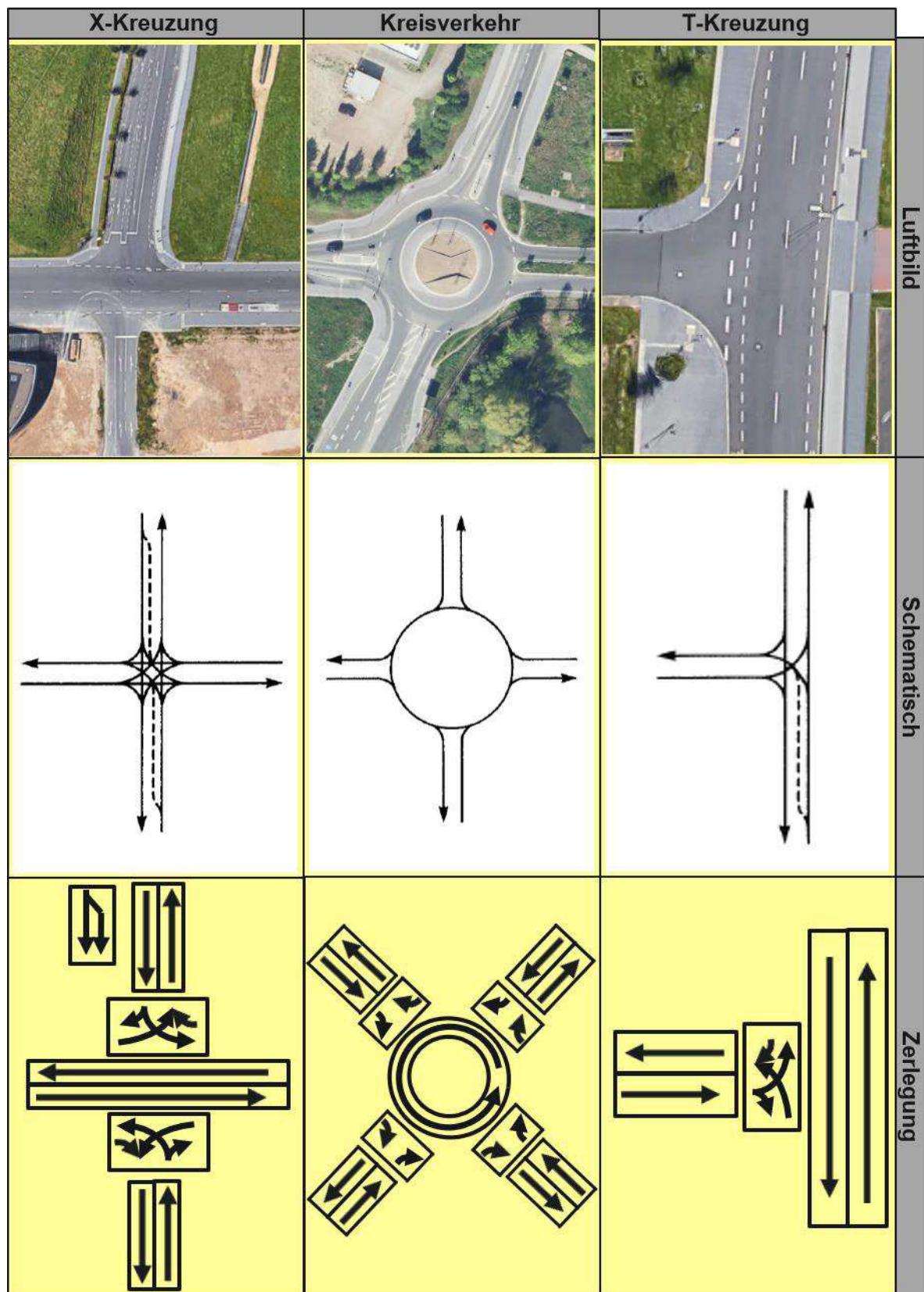


Abb. 3-3: Schrittweise Zerlegung der Segmente in Features

Durch die Einteilung in Segmente, die wiederum aus einzelnen Features bestehen, sind die geometrischen Merkmale eines Straßennetzes herausgearbeitet. Mit dieser Einteilung lässt sich ein Straßennetz erzeugen, welches geometrisch vollständig bestimmt ist.

In der weiterführenden Analyse des Campus-Boulevard werden statische Objekte untersucht, die Einfluss auf den Verkehrsfluss haben. In Abb. 3-4 sind alle einflussnehmenden Objekte farblich markiert. Objekte können unabhängig voneinander in allen Segmenten platziert werden. Die schwarzen Dreiecke symbolisieren Signale. Diese stehen im Allgemeinen für Verkehrsschilder, Lichtsignalanlagen, symbolische Markierungen, Quermarkierungen und Beleuchtungsanlagen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in der Abbildung lediglich die Verkehrsschilder markiert.

Die blauen Rechtecke zeigen die Positionen von Parkflächen auf. Diese können auf vier verschiedene Arten im Straßenraum angeordnet sein. Zunächst gibt es die Varianten von unmarkierten Flächen auf der Fahrbahn. Die zweite Variante beschreibt markierte Parkstreifen bzw. Parkbuchten mit vorgezogenem Bordstein. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit, auf breiten Mittelstreifen oder auf gekennzeichneten Flächen in den Seitenräumen der Straße zu parken. Alle zuvor genannten Varianten können entweder in Längs-, Schräg- oder Senkrechtaufstellung zur Straßenachse angeordnet sein.

Weitere wesentliche Objekte eines Straßennetzes sind Bushaltestellen, die in Abb. 3-4 gelb markiert sind. Nach der RAST gibt es grundsätzlich den Unterschied zwischen der Anordnung bei Mittellage und Seitenlage. Bei der Positionierung der Haltestelle an der Fahrbahnseite kann dies beispielsweise durch Haltbuchten realisiert werden. Eine weitere Möglichkeit sind Haltestellenkaps, die nur für die Haltestelle einen vorgezogenen Bordstein bis unmittelbar an den Fahrbahnrand benötigen. Die am Campus-Boulevard ausschließlich auftretende Variante ist die Haltestelle auf der Fahrbahn, die durch Sondermarkierungen gekennzeichnet ist.

Als letztes verkehrsbeeinflussendes Objekt wird die Verkehrsinsel identifiziert. In der Abbildung kommt diese drei Mal vor und ist durch rote Ellipsen markiert. Für die Anordnung und Ausführung solcher Mittelinseln gibt es jeweils zwei Varianten. Sowohl die Anlage von Inseln als auch die linienhafte Ausführung sind möglich. Der größte Vorteil der Linieninsel besteht in der Überfahrbarkeit der Insel außerhalb der Warteflächen. Die gegenüber der Fahrbahn erhobenen Inseln besitzen hingegen einen höheren Sicherheitsfaktor für den Fußgänger, da ein Fahrzeug vor dem Eintreffen in der Wartefläche zunächst eine Kollision mit dem Bordstein erfährt. Die Mittelinsel kann mit oder ohne Verschwenkung der Fahrstreifen ausgeführt werden. Bei der verschwenkten Variante wird der Fahrstreifen um die Insel herumgeführt und die Breite konstant gehalten. Im Gegenzug wird die Fahrbahnbreite im Bereich der Mittelinsel schmäler, wenn keine Verschwenkung der Fahrstreifen vorliegt [BAI08].

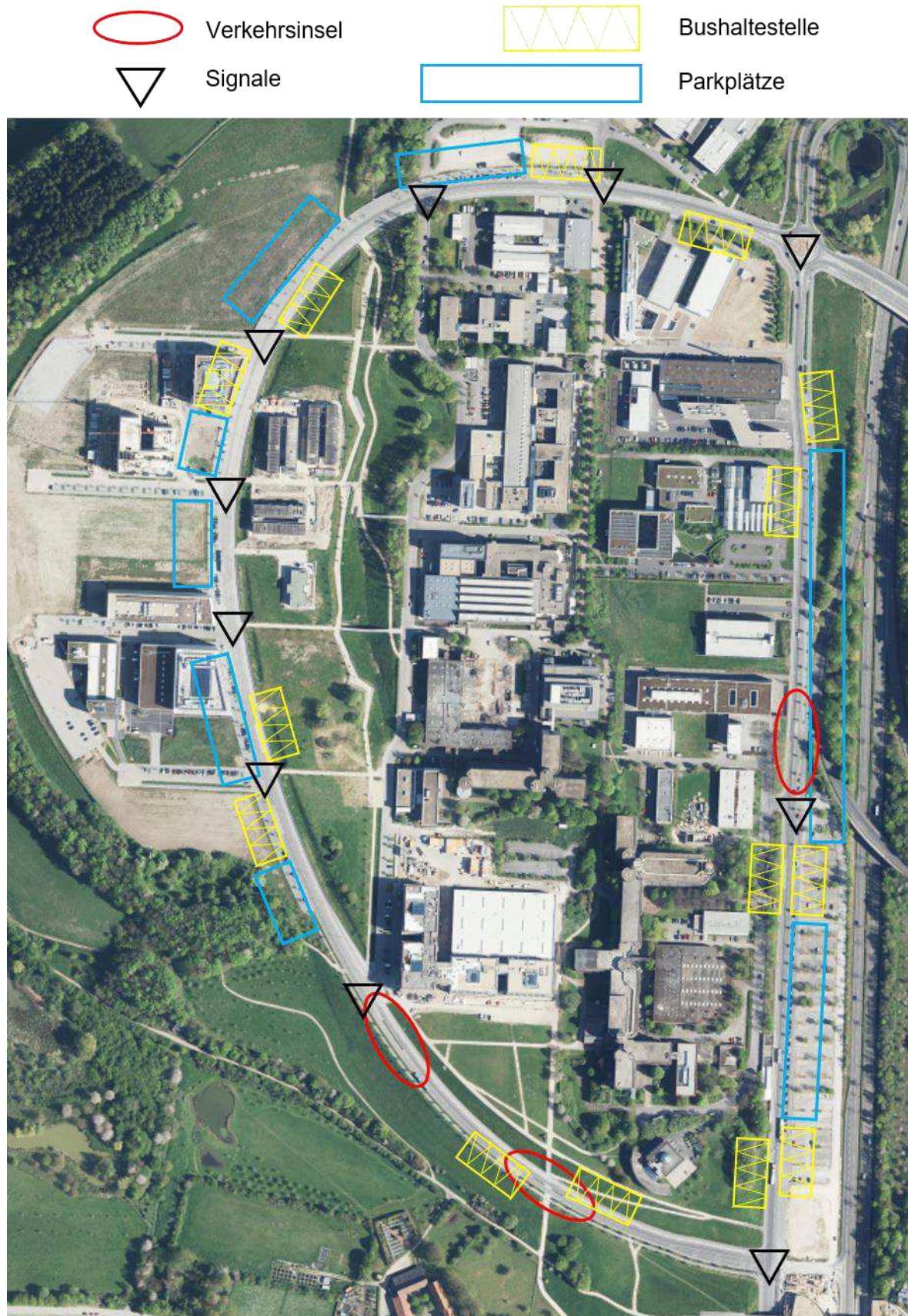


Abb. 3-4: Einteilung eines Straßennetzes in Objekte am Beispiel des Campus-Boulevard

Im letzten Schritt der Analyse eines Straßennetzwerkes wird auf Verkehrseinflüsse geachtet, die einen Einfluss auf die zuvor ermittelten Segmente bzw. Objekte besitzen. Im Anhang in Abb. 11-4 sind potentielle Fußgängerouten rot und Ein- bzw. Ausfahrten zu Privatgeländen gelb dargestellt. Auf den Bau und die Struktur eines solches Netzes wirken sich die Verkehrseinflüsse lediglich durch abgesenkte Bordsteine an den jeweiligen Stellen aus. Ausschlaggebend sind diese Informationen eher für die Planung eines Straßennetzes, da abhängig vom Verkehrs- bzw. Personenaufkommen zusätzliche Objekte, wie beispielsweise eine Mittelinsel, integriert werden müssen.

### 3.3 Konkretisierung des Forschungsansatzes

Der Schwerpunkt der Arbeit bezieht sich auf die Entwicklung eines Konzeptes zur Erstellung logischer und variierbarer Strecken. Dabei gilt es, vor allem die Arbeitsschritte des realen Entwicklungsprozesses der Straßenkonstruktion für die virtuellen Vorgehensweisen zu nutzen. Da die Simulation in erster Linie ein Abbild der Realität ist, wird angestrebt, die virtuellen Straßen nach den Normen und Richtlinien der realen Straßenkonstruktion zu erstellen. Dafür werden die realen Entwicklungsprozesse ermittelt und ein Vorgehen für die virtuelle Straßenkonstruktion entwickelt. Diesbezüglich werden die wesentlichen Segmente eines Straßennetzes herausgearbeitet, wobei diese wiederum aus einer beliebigen Anordnung gewisser Features bestehen. Diese Features sind für logische Strecken allgemeingültig und lassen sich durch Konkretisierung der Parameter individuell für den Anwendungsfall abbilden. Die zu konkretisierenden Parameter sollten intuitive Größen sein, die durch einen logischen Wertebereich konkretisiert werden können. Die Parameter sind die Hauptbestimmungsmerkmale der Segmente und Features und stellen ähnlich zur Realität dessen Variationsmöglichkeiten dar. Eine modulare Bauweise soll dadurch erreicht werden, dass die Segmente unabhängig voneinander in ihrem eigenen Referenzsystem erstellt werden. Die anschließende relative Anordnung der Segmente zueinander ermöglicht Variabilität in der Zusammensetzung und in der anschließenden Bearbeitung. Um den Erstellungsprozess zu vereinfachen und eine Überbestimmtheit beim Schließen eines Straßennetzes zu vermeiden, soll eine Funktion entwickelt werden, die es ermöglicht, zwei Straßenenden mit beliebigem Winkel unter Anwendung der realen Trassierungselemente zu verbinden. Auch die Eingabeform sowie die Struktur des Eingabeformates sollte leicht verständlich sein und eine Anwendung ohne Hilfsmittel ermöglichen. Durch das Vordefinieren der Parameter lassen sich die Angaben bezogen auf den Anwendungsfall auf ein Minimum begrenzen. Für das Eingabeformat sowie die Struktur des Konzeptes mit den entsprechenden Parametern gilt es, ein Optimum zwischen der automatisierten Generierung und der benutzerfreundlichen Bedienung zu finden. Des Weiteren ist bei der Entwicklung zu beachten, dass durch das vorgegebene Eingabeformat das entwickelte Tool vollständige und korrekte OpenDRIVE-Dateien erstellen soll. Grundsätzlich gilt, dass der Anwender im Rahmen der logischen Beschreibung eine vollkommene Gestaltungsfreiheit besitzt, allerdings nur ein Minimum an Informationen verlangt wird.

## 4 Konzept zur Erstellung logischer und variierbarer virtueller Straßen

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Entwicklung eines Konzeptes, welches in diesem Kapitel erläutert wird. Zunächst wird das Vorgehen zur Erstellung eines Straßennetzes auf der Referenzlinienebene betrachtet. Durch die Definition eines Höhenverlaufs entsteht eine Referenzlinie im Raum. Die Zuweisung eines Straßenlayouts und die Positionierung von Verkehrsobjekten schließt den Erstellungsprozess ab. Auf die Liniendefinition in Knotenpunkten und die Realisierung einer Spurbreitenveränderung wird dabei genauer eingegangen.

### 4.1 Referenzlinienebene

In diesem Kapitel wird das Konzept zur Erstellung einer vollständigen Referenzlinie betrachtet. Dafür wird zuerst der Erstellungsprozess für einige Segmente schrittweise erläutert und anschließend die Zusammensetzung dieser Segmente zu einem Straßennetz beschrieben. Das Verbinden zweier Straßenenden, um beispielsweise Lücken im Straßennetz zu schließen, wird durch eine eigens dafür entwickelte Funktion ermöglicht.

#### 4.1.1 Erstellung von Segmenten

Als Grundlage werden zunächst die in Kap.3.2 ermittelten Segmente genutzt. Eine Analyse weiterer Straßennetzwerke hat ergeben, dass auch Kreuzungen mit mehr als vier Zufahrten existieren. Um das Modell der Segmente somit auf alle möglichen Straßennetze zu erweitern, wird das Segment der N-Kreuzung hinzugefügt. Aufgrund der geringen Häufigkeit dieser Kreuzungstypen werden alle Kreuzungsarten mit mehr als vier Zufahrten unter dem Begriff N-Kreuzung zusammengefasst.

Jedes Segment besitzt sein eigenes kartesisches xyz-Koordinatensystem. Die Koordinatensysteme von zwei verschiedenen Segmenten haben keinen Bezug zueinander. In diesem Prozessschritt wird somit zunächst eine Ansammlung von eigenständigen Segmenten erstellt.

Die letztendliche Orientierung der Segmente in Bezug auf das gesamte Straßennetzwerk spielt zunächst keine Rolle. Die Anordnung im Netz erfolgt in einem späteren Schritt, sowohl die Orientierung als auch die genauen Koordinaten werden dort definiert.

Im ersten Schritt wird nun am Beispiel des Segmentes der Verbindungsstraße der Erstellungsprozess erläutert. Eine Verbindungsstraße ist eine Straße und besitzt eine Referenzlinie, die aus zusammengesetzten Geometrien besteht. Jede Referenzlinie besitzt zwei Koordinatensysteme. Einerseits ein festes xyz-Koordinatensystem und anderseits ein mitbewegtes stz-Koordinatensystem. Die Geometrieauswahl besteht analog zum realen Straßenbau aus Kap. 2.3.2.1.1 aus den Grundelementen Kreisbogen, Klohoide und Gerade. Die als erste erstellte Geometrie startet im Ursprung des xyz-Koordinatensystems der Referenzlinie. Die Orientierung der ersten Geometrie ist nach folgender Überlegung vorgegeben: Bei der Geraden beträgt der Winkel zur x-Achse null Grad und somit liegt diese genau auf der x-Achse. Über die Angabe einer Länge ist die Gerade somit vollständig in der

xy-Ebene bestimmt. Der Kreisbogen ist so positioniert, dass die Tangente am Kreisbogen im Ursprung des Koordinatensystems genau auf der x-Achse liegt. Durch die Angabe einer Länge für den Bogen und eines konstanten Radius ist der Kreisbogen bestimmt. In den Wert für den Radius wird die Krümmungsrichtung integriert. Es wird festgelegt, dass positive Werte für den Radius einen linksgekrümmten Kreisbogen und negative Werte einen Rechtsgekrümmten definieren. Die Spirale startet so im Ursprung, dass auch in diesem Fall die Tangente im Wendepunkt der Spirale auf der x-Achse liegt. Eine Spirale wird über eine Länge, den Start- sowie Endradius definiert. Wie bei dem Kreisbogen gilt hier die Definition, dass positive Werte für die Radien eine Linkskrümmung erzeugen und negative Werte eine Rechtskrümmung.

Jede weitere fortführende Geometrie kann an das Ende oder an den Anfang einer bereits erstellten Geometrie angesetzt werden. Dabei wird die nachfolgende Geometrie so an die Vorgängergeomtrie gesetzt, dass die Koordinaten und der Winkel übereinstimmen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass auch die Krümmung übereinstimmt und keine Krümmungssprünge entstehen. Diesbezüglich sollte zwischen einer Geraden und einem Kreisbogen oder zwei Kreisbögen mit unterschiedlichen Radien immer eine verknüpfende Spirale eingebaut werden, sodass das Krümmungsband keine Sprünge aufweist und der Fahrer ein komfortables Lenkgefühl erhält. Durch die Start- und Kopplungsbedingungen können komplexe zusammengesetzte Geometrien erzeugt werden, ohne externe Hilfsmittel zu nutzen.

Als nächstes werden die Arbeitsschritte zur Erzeugung eines der Knotenpunktsegmente erläutert. Eine T-Kreuzung besteht nach der schematischen Zerlegung aus Kap. 3.2 aus zwei Straßen und einer Schnittstelle. Die Straßen besitzen jeweils eine Referenzlinie, die nach dem zuvor erläuterten Prinzip erzeugt wird. Die Referenzlinien der beiden Straßen werden zunächst unabhängig voneinander erstellt. In Abb. 4-1 werden die Arbeitsschritte und die Beziehungen am Beispiel der T-Kreuzung, bestehend aus zwei geraden Referenzlinien, verdeutlicht. In Bild (a) sieht man die beiden Linien jeweils definiert über ihre Längen in unabhängigen Koordinatensystemen. Im nächsten Schritt wird die Lage des Schnittpunktes auf den jeweiligen Referenzlinien angegeben. Die Angabe wird über die Laufkoordinate  $s$  des mitbewegten Koordinatensystems angegeben. In Bild (b) ist dies für beide Referenzlinien durch rote Punkte dargestellt. Dabei liegt der Schnittpunkt der ersten Geometrie nach einer auf der Referenzlinie zurückgelegten Strecke  $s_1$ . Gleiches gilt für die zweite Referenzlinie, wobei hier der Schnittpunkt auf der Geometrie nach  $s_2 = 0m$  liegt. Abschließend werden nun die zwei Referenzlinien zu einer T-Kreuzung zusammengesetzt. Dafür wird zunächst ein Koordinatensystem aus den beiden vorhandenen Systemen als Hauptkoordinatensystem für das Segment referenziert. Im Beispiel aus Abb. 4-1 Bild (c) wird das System der ersten Referenzlinie festgelegt. Durch die Angabe eines Winkels  $\alpha$  ist die Lage der beiden Referenzlinien eindeutig bestimmt, da dieser den Schnittwinkel der beiden Geometrien definiert. Betrachtet wird der Winkel von der Geometrie des referenzierten Koordinatensystems zu der verknüpfenden Geometrie. Diesbezüglich sind Winkel aus den Bereichen von  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$  zulässig. Somit wird die zweite Referenzlinie unter Einhaltung des Winkels und des Schnittpunktes in das festgelegte Koordinatensystem verschoben und gedreht.

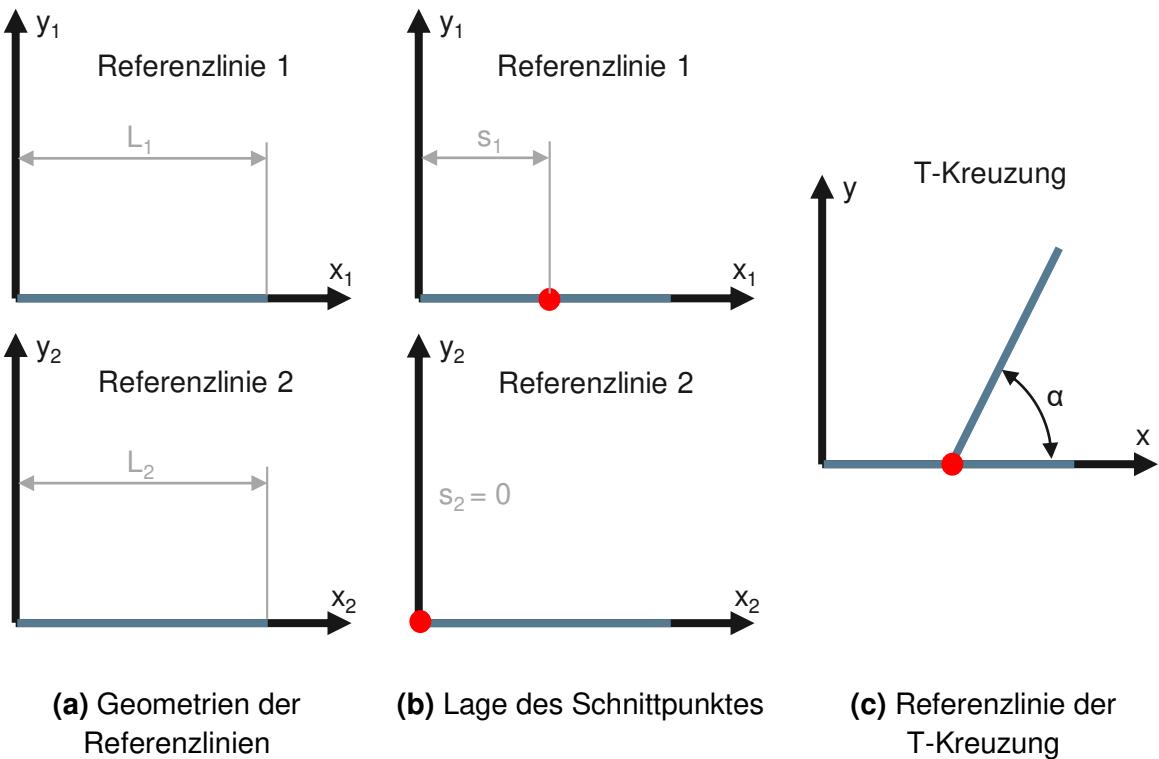


Abb. 4-1: Arbeitsschritte zum Erstellen der Referenzlinie einer T-Kreuzung

Als weiteres Beispiel zur Erstellung von Segmenten wird mit Hilfe von Abb. 4-2 der Erstellungsprozess eines Kreisverkehrs genauer erläutert. Ein Kreisverkehr mit vier Zufahrtsstraßen besteht aus fünf zusammengesetzten Referenzlinien. Im oberen Teil von Bild (a) ist die erste Referenzlinie bestehend aus einer Kreisbahn dargestellt. Der untere Teil zeigt die restlichen Referenzlinien, da hier beispielhaft vier gleiche Geraden als Zufahrtsstraßen genutzt werden. Durch die roten Punkte sind in Bild (b) die Lagen der Schnittpunkte auf den Referenzlinien markiert. Dies wird bei Geraden wie bei der T-Kreuzung über die Laufkoordinate  $s$  angegeben. Bei Kreisbögen und Spiralen kann dies zum einen analog über die Bogen- bzw. Spirallänge und zum anderen über die Angabe eines Winkels angegeben werden. Abschließend werden ein Koordinatensystem für das Segment festgelegt, in diesem Fall das der Kreisbahn, und die anderen Referenzlinien entsprechend der jeweiligen Schnittpunkten zugeordnet und über die Angabe der Winkel eindeutig verknüpft (siehe Bild (c)).

Das Vorgehen zur Erstellung eines Knotenpunktsegmentes ist für alle Kreuzungen und Kreisverkehre identisch. Zunächst werden alle benötigten Referenzlinien aus den möglichen Geometrien zusammengesetzt. Auf allen Referenzlinien wird dann die Lage der Schnittpunkte markiert. Durch Festlegung eines Koordinatensystems werden die Referenzlinien unter Angabe des Winkels zusammengesetzt.

Es gibt theoretisch mehrere Möglichkeiten, ein Kreuzungssegment zusammenzusetzen. Dies ist abhängig vom Anwendungsfall und der genauen Art der Kreuzung. So kann eine T-Kreuzung aus drei einzelnen Straßen zusammengesetzt werden, bei der alle Zufahrtsstraßen die gleiche Priorität besitzen. Dies entspricht in der Realität einer Kreuzung mit Rechts-vor-Links-Regelung oder einer mit Lichtsignalanlage. Wird eine T-Kreuzung aus zwei Straßen zusammengesetzt, so gibt es eine Haupt- und eine Nebenstraße.

Für eine X-Kreuzung gibt es drei verschiedene Erstellungsmöglichkeiten. Die erste Variante besteht aus drei Straßen, einer Haupt- und zwei Zufahrtsstraßen. Der zweite Fall wird aus vier einzelnen Straßen erstellt und die letzte Variante besitzt zwei Straßen. Auch hier kann die Erstellungsvariante bezüglich Kreuzungsart und Anwendungsfall individuell gewählt werden.

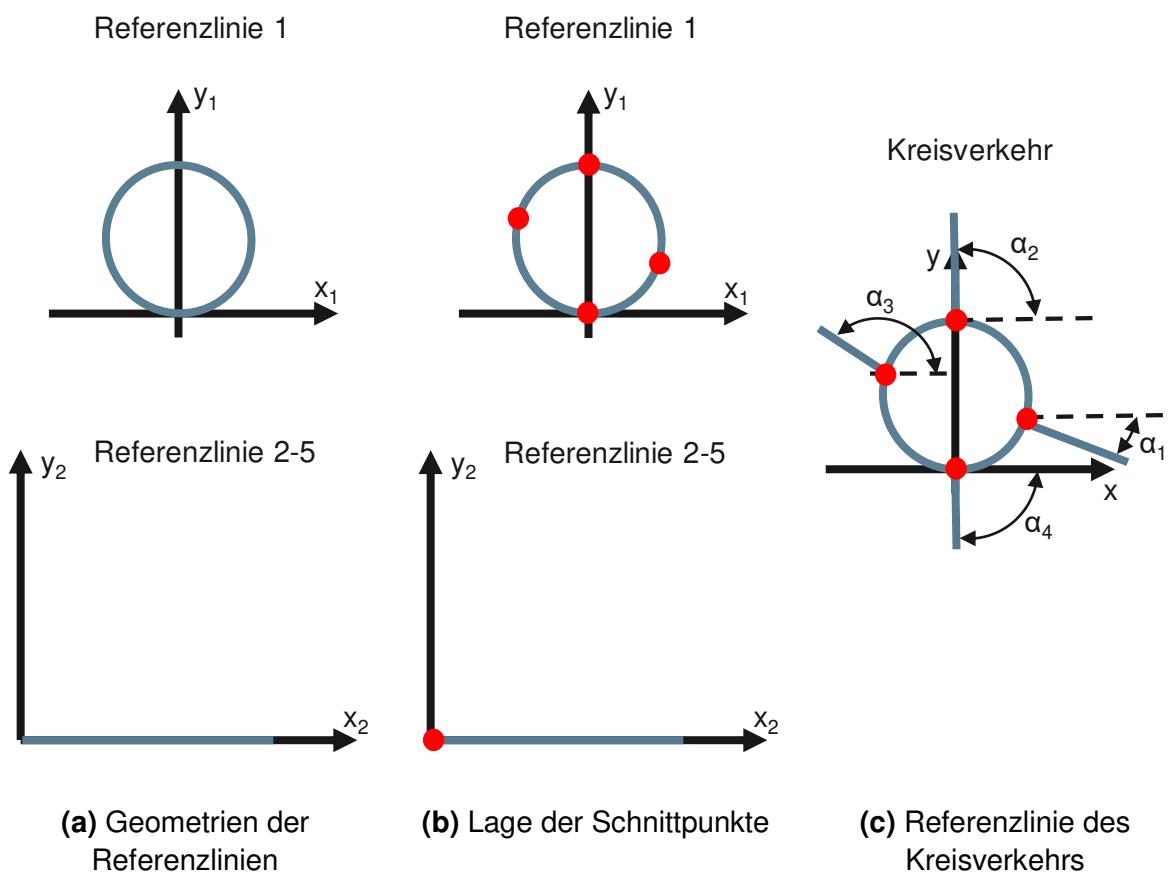


Abb. 4-2: Arbeitsschritte zum Erstellen der Referenzlinie eines Kreisverkehrs

#### 4.1.2 Erstellen eines Straßennetzes

Liegen nun alle notwendigen Segmente zur Erstellung eines Straßennetzes vor, so werden diese als nächstes an den gewünschten Stellen positioniert. Im ersten Schritt wird ein Segment ausgewählt, dessen Koordinatensystem zu dem globalen Koordinatensystem des Straßennetzes angeordnet wird. Das Koordinatensystem des Segmentes wird zunächst in den Ursprung des globalen Systems gesetzt und anschließend über die Angabe eines x-, y-Offsets und eines Rotationswinkels um die z-Achse genau positioniert, siehe Abb. 4-3 Bild (a). Dies

ist die einzige festgelegte Beziehung zum globalen System, denn die anderen Segmente werden relativ zueinander positioniert. In Bild (b) der Abbildung ist die Positionierung der weiteren Elemente dargestellt. Die Positionierung der anderen Segmente funktioniert nach folgendem Prinzip: Im ersten Schritt wird über die Segmentnummer angegeben, welche beiden Segmente verbunden werden sollen. In Bild (b) wird zunächst das Segment „II“ mit dem Segment „I“ verbunden. Des Weiteren besitzt jedes offene Straßenende eines Segmentes eine Bezeichnung. Dementsprechend wird für das Zusammensetzen der Segmente jeweils ein Straßenende genannt, welches verknüpft werden soll (siehe Bild (b) rote Punkte). Durch die Angabe der Segmentnummern und der Bezeichnungen der Straßenenden ist die Position des zweiten Segmentes eindeutig bestimmt, denn neben dem Aufeinandersetzen der beiden Punkte werden die Straßen tangential verknüpft. Dadurch liegt kein Winkelsprung in der Straßengeometrie vor und der Straßenverlauf besitzt rein optisch keinen Knick. Genau wie beim Zusammensetzen von Geometrien sollte darauf geachtet werden, dass kein Krümmungssprung vorliegt. Diese Bedingung kann durch das reine Anordnen der Segmente nicht zwangsläufig erreicht werden. Diesbezüglich wird im Erstellungsprozess der Referenzlinien der Segmente festgelegt, wie der Krümmungszustand am Ende der Straßen ist. Es sollte also beim Erstellen darauf geachtet werden, welche Segmente miteinander verbunden werden und wie der Krümmungszustand der Straße an der Schnittstelle zweier Segmente sein sollte.

Liegt bei der Verbindung zweier Segmente jedoch ein Krümmungssprung vor, so besitzt das Tool die Möglichkeit, eine Verbindung ohne Krümmungssprung zu erzeugen. Dafür wird zwischen den zu verbindenden Segmenten ein zusätzliches Segment eingesetzt, welches die Krümmungszustände angleicht. Dieses Ausgleichssegment besteht aus einer Spirale, da dieses geometrische Element alle Krümmungszustände miteinander verbinden kann. Ausgelegt wird die Spirale nach den minimalen Richtwerten der RAS-L, sodass das Element so klein wie möglich ausgeführt ist und so den wesentlichen Verlauf des Straßennetzes nicht maßgebend verändert.

Zusätzlich ist in der Abbildung die Verknüpfung der Segmente „III“ und „II“ dargestellt. Auch hier erfolgt die Vorgehensweise analog über die Angabe der Endpunkte der Straßen. Durch die Idee des modularen Zusammensetzens der Segmente zu einem Straßennetzwerk wird dessen Variabilität erreicht. Das heißt, dass beispielsweise die Straße aus Segment „II“ nach der Erstellung eines Straßennetzes nachträglich in ihrer Länge bzw. Geometrie geändert werden und das Segment „III“ sowie darauffolgende Segmente an die neue Lage angepasst werden können. Diese automatische Anpassung ist nur möglich, da die Segmente immer auf die entsprechenden Straßenendpunkte des Vorgängersegmentes referenziert sind. Somit kann ein erstelltes Straßennetzwerk allein durch die beliebige Variation der Straßenparameter beliebig neue Umweltszenarien erzeugen. Auch die Variation der Segmentanordnung liefert bei geringem Aufwand unzählige neue Straßennetze.

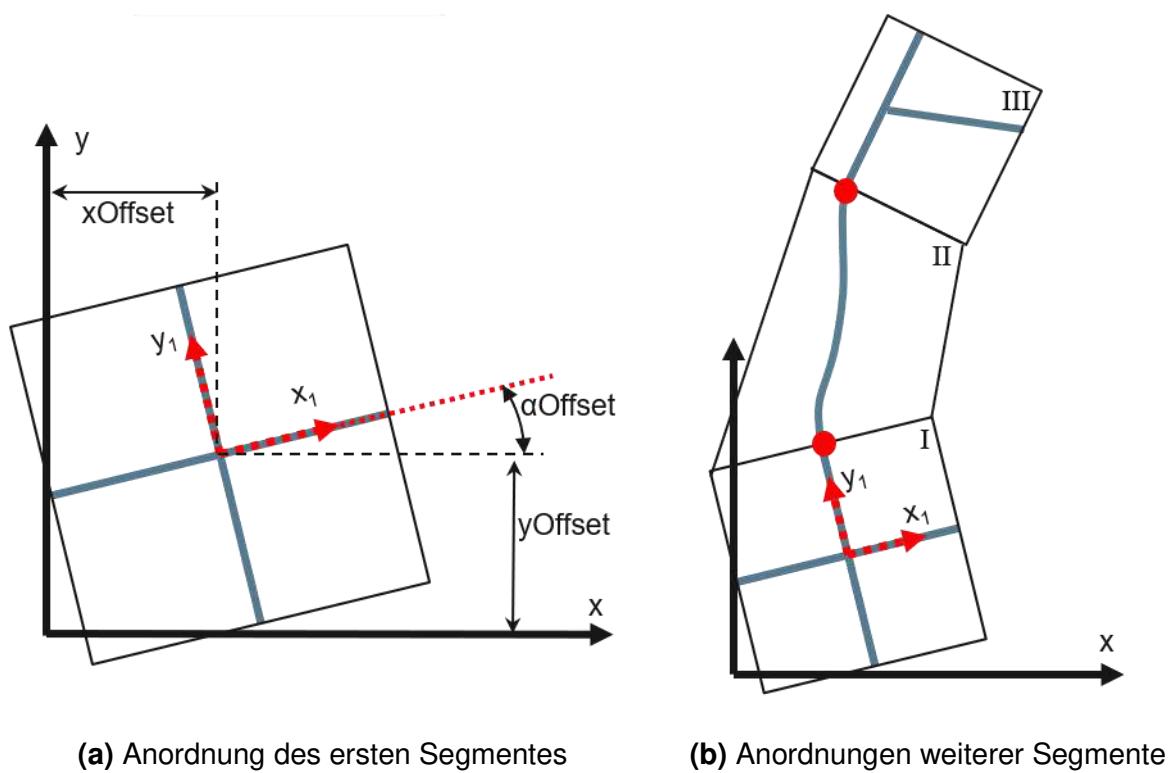


Abb. 4-3: Anordnen der Segmente in einem Straßennetzwerk

#### 4.1.2.1 Schließen des Straßennetzes

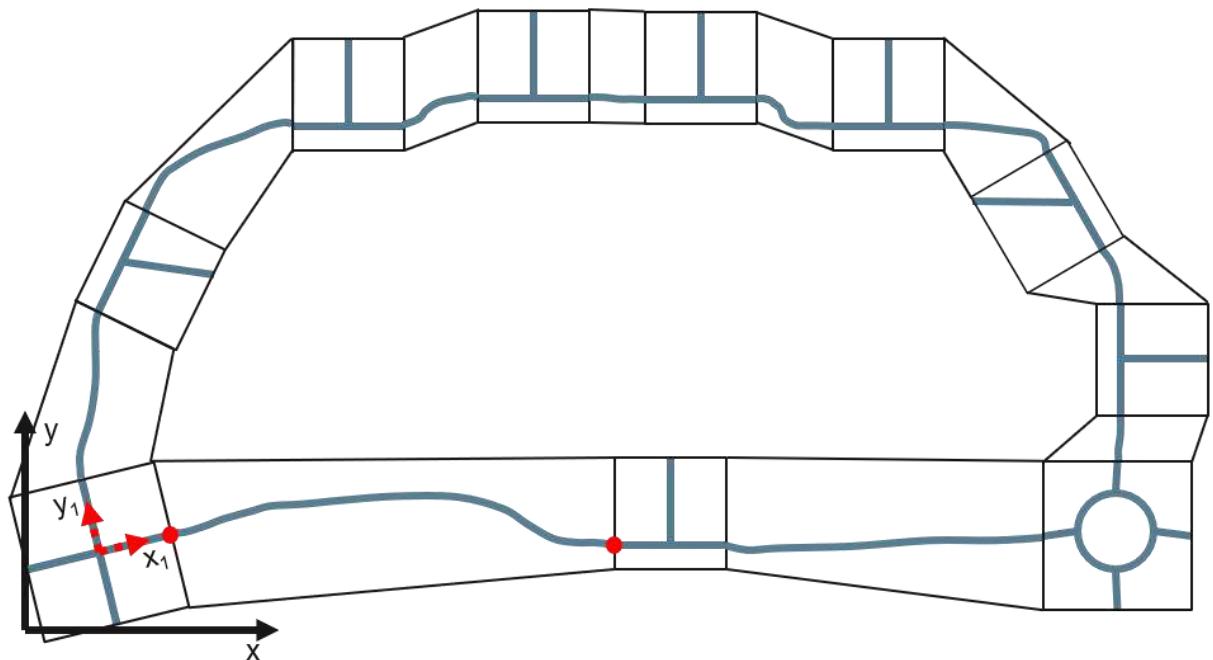


Abb. 4-4: Schließen eines Straßennetzwerkes durch das letzte Segment

Das Schließen eines Straßennetzwerkes mit einem Segment zeigt den Fall auf, bei dem zwei Punkte mit den angrenzenden Segmenten übereinstimmen müssen. In Abb. 4-4 sind die beiden einzuhaltenden Punkte rot markiert. In diesem Fall ist eine hohe Genauigkeit bei der Erstellung des letzten Segmentes erforderlich und die Bestimmung der genauen Geometrien erfordert womöglich erhöhten Rechenaufwand. Das schließende Segment eines Straßennetzwerkes besitzt somit keine freien Entwurfsmöglichkeiten der Straße, da gewisse Geometrieparameter durch die einzuhaltenden Randbedingungen vorgegeben sind. Durch die Angabe aller Parameter entsteht die Gefahr der Überbestimmtheit, da nicht alle Parameter notwendig sind.

Durch die vorgegebenen Randbedingungen, dass die Punkte exakt übereinstimmen müssen und kein Winkelsprung vorliegen soll, entsteht durch das Schließen dieser Lücke unnötiger Aufwand. Zur Vereinfachung des Erstellungsprozesses wird eine Funktion entwickelt, welche zwei Punkte unter Einhaltung der Randbedingungen verbindet. Bei der Anwendung der Funktion wird vorausgesetzt, dass die exakte Geometrie der Straße keine hohe Priorität besitzt, da abhängig vom Schnittpunkt ein vom Algorithmus ermittelter Straßenverlauf konstruiert wird.

Die Eingangsdaten der Funktion sind die genauen xy-Koordinaten und die Winkelstellungen der zu verbindenden Straßenenden. Anforderung an die Funktion ist die Verbindung aller möglicher Konstellationen, unabhängig von der jeweiligen Winkelstellung und der Dimension der Abstände. Zur Verbindung der Streckenarme wird zunächst deren genaue Lage zueinander untersucht. Dafür werden an die Enden der Straße Vektoren gesetzt. Zunächst wird definiert welche Richtung der Straßenfluss besitzt, also welches Straßenende der Start- und welcher der Endpunkt ist. Der Vektor, der am Startpunkt sitzt, zeigt in die Richtung der zu erzeugenden Straße. Am Endpunkt zeigt der Vektor in Richtung der bisherigen Straße. Somit zeigen die Vektoren in die Flussrichtung der neuen Straße, die im Startpunkt mündet und in den Endpunkt fließt.

Die Vektoren werden nun in beide Richtungen verlängert und der Schnittpunkt der gebildeten Geraden analysiert und dementsprechend klassifiziert. Es wird unterschieden, ob ein Vektor im positiven oder im negativen geschnitten wird. Ein spezieller Sonderfall liegt vor, wenn ein Vektor durch den Ursprung des anderen Vektors verläuft. Ein Schnittpunkt erhält eine eindeutige Bezeichnung durch die Kombination aus zwei Buchstaben. Die möglichen Buchstaben für die Bezeichnung bestehen aus „p, n, 0“. Dabei steht „p“ für den Fall, dass der Schnittpunkt in positiver Richtung des Vektors liegt, „n“ für die Lage in negativer Richtung und „0“, für den Schnittpunkt durch den Ursprung des Vektors. Das Beispiel „pn“ bezeichnet somit einen Schnittpunkt, bei dem der erste Vektor in dessen positiver Richtung und der zweite Vektor im Negativen geschnitten wird. Die möglichen Kombinationen dieser drei Buchstaben beschreiben somit alle Schnittpunktarten. Es gibt allerdings auch zwei Fälle, die keinen eindeutigen Schnittpunkt besitzen. Dies ist zum einen der Fall, dass die Verlängerungen der Vektoren genau aufeinander liegen und theoretisch unendlich viele Schnittpunkte besitzen. Dieser Fall wird mit „i“ wie identisch bezeichnet. Für den gegensätzlichen Fall, dass aufgrund einer Parallelität der Vektoren kein Schnittpunkt vorliegt, wird dieser mit „p“ bezeichnet. In Abb. 4-5 sind alle möglichen Stellungen der Straßenenden dargestellt. Die roten Punkte stehen für die Straßenenden des Straßennetzes, die verbunden werden sollen. Der blaue Pfeil

zeigt den Vektor im Startpunkt und durch den grünen Pfeil wird die der Vektor im Endpunkt der neuen Straße repräsentiert. Die zu erstellende Straße verläuft somit vom Ursprung des blauen Vektors in den grünen Vektor. Die gestrichelten Linien zeigen die Verlängerungen der Vektoren und die weißen Kreuze die resultierenden Schnittpunkte. In der oberen linken Ecke der Kästchen sind die Bezeichnungen der jeweiligen Schnittpunkte zu finden. Für alle Schnittpunktarten wird eine kleinschrittige Vorgehensweise entwickelt, die zum Verbinden der Straßenenden führt. Da für das Verbinden zweier Straßenenden theoretisch unzählige Varianten zum Ziel führen, werden allgemeingültige Bedingungen festgelegt. Als erstes wird die Geometrieauswahl auf zwei Kurventypen eingeschränkt. Zum einen wird die Gerade genutzt, um Distanzen zu überbrücken. Zum anderen werden Verbundkurven verwendet, damit Richtungsänderungen erzeugt werden können. Durch die mehrfache Kombination dieser beiden Elemente können alle möglichen Stellungen der beiden Straßenenden ohne Winkel- oder Krümmungssprung verbunden werden. Damit die Geometrien nach den Richtwerten der RAS-L ausgelegt werden können und nicht übermäßig gestreckt oder getaucht werden, gilt es, Hilfspunkte einzusetzen. Zwischen zwei Hilfspunkten erstreckt sich somit entweder eine Gerade oder eine Verbundkurve. Die Generierung der Hilfspunkte erfolgt automatisiert und wird für jeden Schnittpunkt individuell gewählt. Ob und wie viele Hilfspunkte benötigt werden hängt von der Schnittpunktart und den Abständen der Straßen zueinander ab. Wird ein Hilfspunkt ermittelt, so wird der Startpunkt mit dem Hilfspunkt durch eine der beiden Kurventypen verbunden. Im Anschluss daran wird der bisherige Hilfspunkt zum Startpunkt und die zu erstellende Straße spannt sich zwischen den zwei neuen Punkten auf. Von dem neuen Startpunkt aus beginnt die Vorgehensweise von vorne. Das bedeutet, dass der Schnittpunkt analysiert und dementsprechend entschieden wird, ob ein Hilfspunkt benötigt wird und wo dieser liegt. Diese Vorgehensweise wird so lange wiederholt, bis der Zielpunkt erreicht und das Straßennetzwerk geschlossen ist. Die Angabe eines Hilfspunktes enthält zum einen die xy-Koordinaten und zum anderen Winkel, den die Geometrie in diesem Punkt besitzen soll. Die Wahl der Geometrie, die Notwendigkeit eines Hilfspunktes und gegebenenfalls dessen Position und Winkel werden abhängig von der Art des Schnittpunktes und den Abständen von Start- und Endpunkt gewählt. Im Folgenden wird für die einzelnen Schnittpunktarten, die in Abb. 4-5 dargestellt sind, die Vorgehensweise zum Schließen des Straßennetzwerkes genauer erläutert. Im Anhang sind in Abb. 11-1, Abb. 11-2 und Abb. 11-3 diese Vorgänge zur besseren Übersicht in einem Baumdiagramm dargestellt.

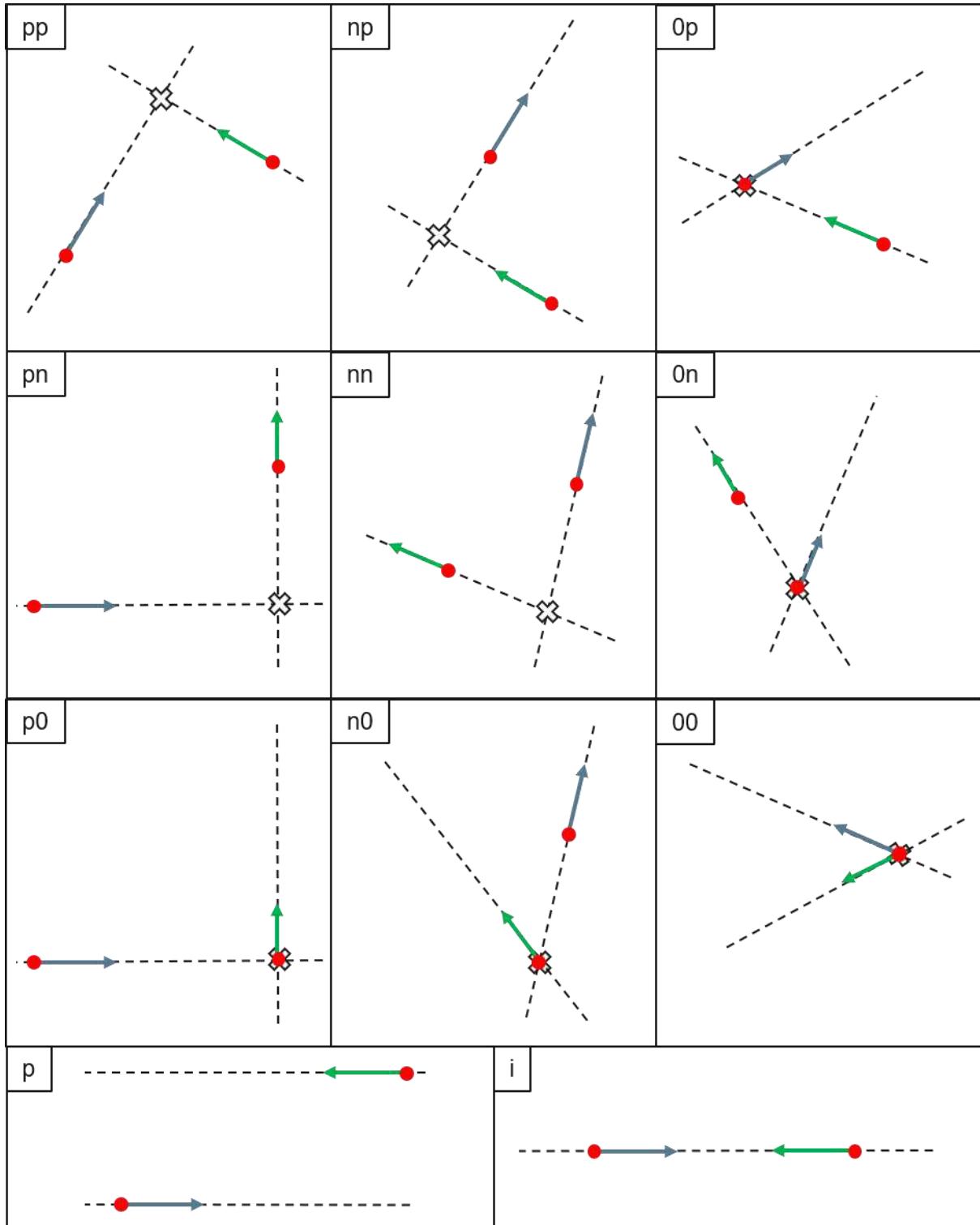


Abb. 4-5: Darstellung aller Schnittpunktarten der Vektoren an den Straßenenden

**Schnittpunkt „pn“:**

Die Schnittpunktart „pn“ besitzt zwei verschiedene Varianten, die die Erstellung der Hilfspunkte und der Straße beeinflussen. Die Varianten unterschieden sich in den Abständen vom Start- und Endpunkt zum Schnittpunkt. Zunächst wird der Fall aus Abb. 4-6 betrachtet. In Bild „I“ ist

der blaue Vektor entstehend aus dem Startpunkt „0“ und der grüne Vektor aus dem Endpunkt „E“ zu erkennen. Von Bedeutung ist dabei ausschließlich die Richtung der Vektoren. Deren Länge hat keinen Einfluss. Unterschiedlich lange Vektoren in den Abbildungen dienen lediglich der besseren Visualisierung aufgrund von Platzgründen. Des Weiteren werden wie in der Abbildung zuvor die Vektoren durch schwarz gestrichelte Linien verlängert, der Schnittpunkt durch ein weißes Kreuz markiert und die Art des Schnittpunktes durch eine Buchstabenkombination beschrieben. Der markierte Abstand  $d_{EIp}$  steht für die Entfernung vom Endpunkt zum Schnittpunkt (engl. Intersection Point) und der Abstand  $d_{0Ip}$  für die Distanz zwischen Startpunkt und Schnittpunkt. Nun wird verglichen, welche der beiden Strecken kleiner ist. Im vorliegenden Fall der Abbildung ist der Abstand zum Endpunkt geringer, sodass ein Hilfspunkt (HP) benötigt wird. Wie in Bild „II“ dargestellt, wird die Strecke  $d_{EIp}$  um den Schnittpunkt rotiert und so auf die Verlängerung des blauen Vektors projiziert. Da der Hilfspunkt auf dem blauen Startvektor liegt, ergibt sich für den Winkel in dem Punkt der gleiche, den die Straße im Startpunkt besitzt. Somit lassen sich die Punkte mit einer Geraden verbinden. In Bild „III“ ist die gerade rot dargestellt und zählt nun zum vorhandenen Straßennetz. Dadurch entstehen neue Straßenenden, die verbunden werden sollen, da der vorherige Hilfspunkt nun der neue Startpunkt ist. Es werden wieder Vektoren in den Start- und Endpunkt gelegt und der Schnittpunkt analysiert. Die Schnittpunktart ist erneut „pn“, sodass als nächstes die Abstände zum Schnittpunkt betrachtet werden. Im Fall von Bild „III“ sind die beiden Längen  $d_{EIp}$  und  $d_{0Ip}$  gleich groß. Nun wird kein weiterer Hilfspunkt mehr benötigt und die Punkte können mit einer Verbundkurve verknüpft werden. In Bild „IV“ ist abschließend die vollständig erstellte Straße mit den Hilfspunkten in rot dargestellt.

Die Krümmungsrichtung der Verbundkurve wird anhand der folgenden Überlegung ermittelt: Eingesetzt wird ein zusätzliches kartesisches Koordinatensystem, das nur zur Bestimmung der Krümmungsrichtung genutzt wird. Diese lässt sich mit der Rechten-Hand-Regel bestimmen, wobei die x-Achse in Richtung des Startvektors zeigt, die z-Achse aus der Bildebene heraus ragt und der Ursprung mit dem Startpunkt übereinstimmt. Berechnet wird dann die y-Koordinate des Endpunktes in Bezug zu diesem Koordinatensystem. Ist der Wert negativ, so wird die Verbundkurve mit einer Rechtskrümmung ausgeführt. Positive Werte bewirken eine Linkskrümmung. Aufgrund der Lage und Orientierung des Koordinatensystems betrachtet man den Endpunkt theoretisch aus der Sicht des Startpunktes. Liegt der Endpunkt dann auf dessen rechten Seite, so wird eine Rechtskrümmung benötigt. Befindet er sich hingegen auf der linken Seite des Startpunktes, so verläuft auch die Verbundkurve nach links. Entspricht der y-Wert des Endpunktes Null, so liegt entweder der Fall „p0“ oder „n0“ vor. Zur Bestimmung der Krümmungsrichtung sind weitere Schritte notwendig, die in dem zugehörigen Abschnitt vorzufinden sind.

Für den Schnittpunkttypen „p“ wird im zugehörigen Abschnitt noch ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Krümmungsrichtung erläutert.

Liegt der Fall vor, dass die Vektoren auf der gleichen Linie liegen (Schnittpunkttyp: „i“), so sind beide Krümmungsrichtungen möglich, da der Straßenverlauf zum Verbinden der Straßenenden für beide Seiten identisch ist.

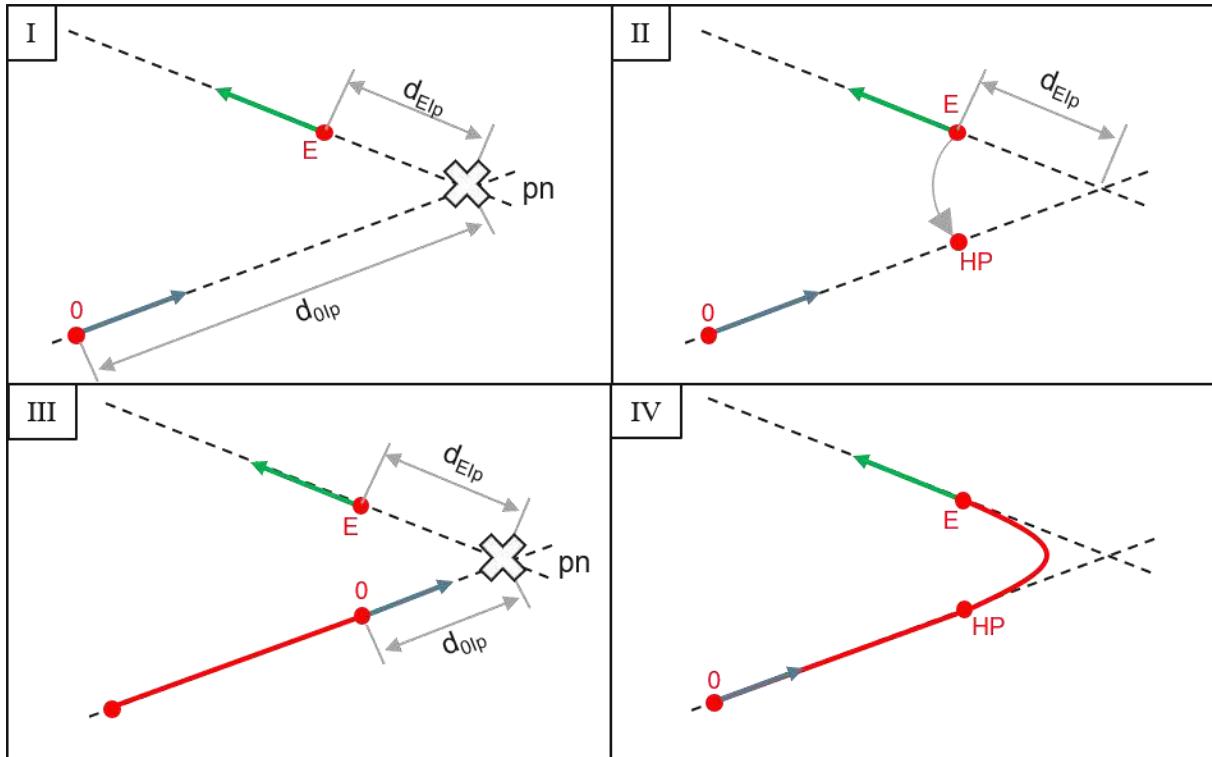


Abb. 4-6: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „pn“ und der Fall, dass  $d_{EIp} < d_{0Ip}$  ist

Der zweite Fall, der bei der Schnittpunktart „pn“ auftreten kann, ist in Abb. 4-7 dargestellt. In Bild „I“ ist die Ausgangssituation dargestellt. Nun ist allerdings  $d_{0Ip} < d_{EIp}$  und der benötigte Hilfspunkt wird auf eine andere Weise ermittelt. Die Strecke  $d_{0Ip}$  wird stattdessen um den Schnittpunkt gedreht und auf den grünen Endvektor projiziert. In Bild „II“ ist dieser Prozess dargestellt, sodass die Lage des Hilfspunktes definiert ist. Die erzeugte Geometrie muss im Hilfspunkt die gleiche Winkellage wie der Endpunkt besitzen. Zwischen Start- und Hilfspunkt wird die in Bild „III“ rot dargestellte Verbundkurve gelegt. Anschließend wird erneut der ehemalige Hilfspunkt zum Startpunkt und der Schnittpunkt der aktuellen Straßenenden wird untersucht. Die Vektoren liegen auf einer Linie, sodass die Bezeichnung des Schnittpunktes „i“ lautet. Die genaue Vorgehensweise für diesen Fall, ist in dem Abschnitt „Schnittpunkt i“ beschrieben. In Bild „IV“ ist beispielhaft die vollendete Strecke für diesen Anwendungsfall dargestellt.

Sind die Abstände  $d_{EIp}$  und  $d_{0Ip}$  von Beginn an gleich, so wird kein Hilfspunkt benötigt und die Punkte können über eine Verbundkurve miteinander verbunden werden.

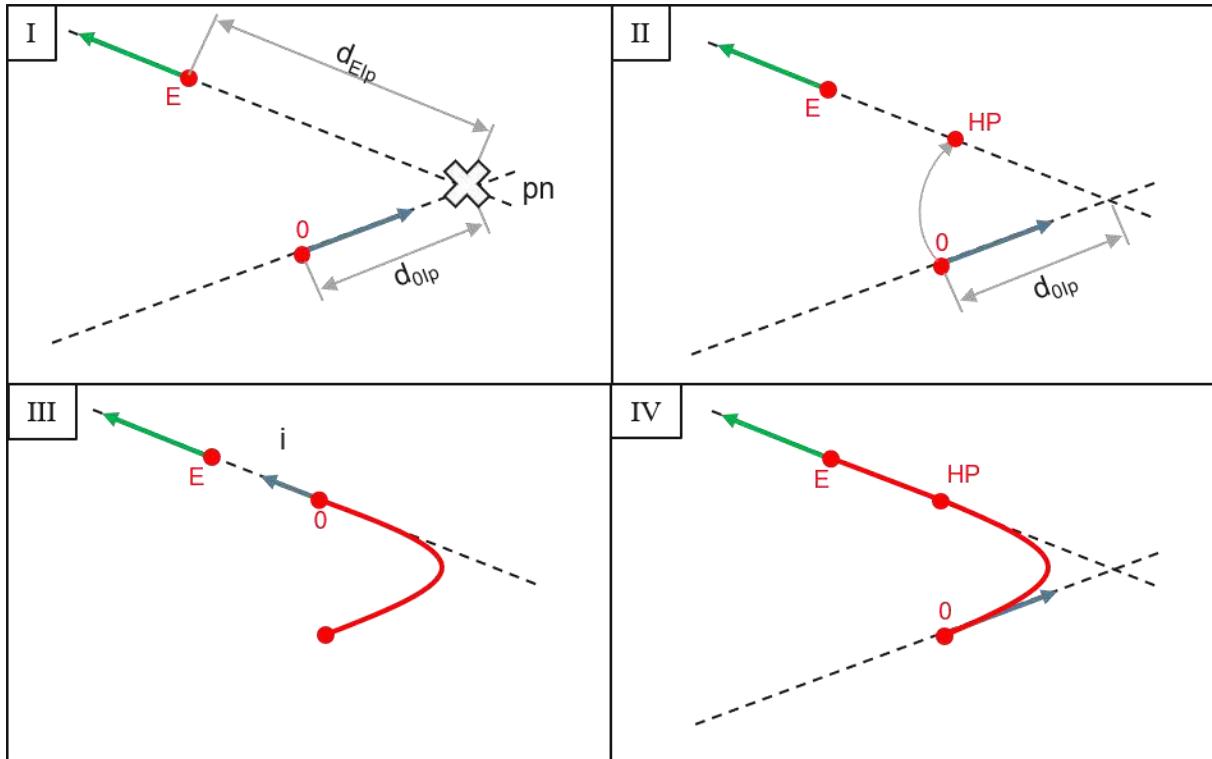


Abb. 4-7: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „pn“ und der Fall, dass  $d_{0Ip} < d_{EIp}$  ist

#### Schnittpunkt „i“:

Zur Differenzierung der Unterpunkte für die Schnittpunktvariante „i“ wird die Variable  $\beta$  eingeführt. Diese beschreibt den Differenzwinkel zwischen den Straßenenden:

$$\beta = \varphi_2 - \varphi_1 \quad \text{Gl. 4-1}$$

Dabei beschreibt  $\varphi_1$  die Winkelstellung des ersten Straßenendes und  $\varphi_2$  die Winkelstellung des zweiten Straßenendes bezogen auf die x-Achse.

Die Vektoren der Straßenenden sind identisch für den Fall, dass  $\beta = 0 \mp k \cdot 2\pi$  mit  $k \in \mathbb{Z}$  oder  $\beta = \pi \mp k \cdot 2\pi$  mit  $k \in \mathbb{Z}$  und besitzen theoretisch unendliche viele Schnittpunkte. In Abb. 4-8 ist der Fall  $\beta = \pi$  dargestellt. In Bild „I“ ist die Ausgangssituation mit den Vektoren, der Schnittpunktart und den zugehörigen Winkelstellungen dargestellt. Mithilfe dieser Informationen steht fest, dass ein Hilfspunkt benötigt wird. In Bild „II“ wird das konstruktive Vorgehen zur Ermittlung der Lage des Hilfspunktes visualisiert. Der Abstand zwischen Start- und Endpunkt  $d_{0E}$  wird zu einem Viertel um  $135^\circ$  um den Startpunkt gedreht. Somit liegt der Hilfspunkt in einem Winkel von  $45^\circ$  und einem Abstand von  $0,25 \cdot d_{0E}$  zum Startvektor. In diesem Hilfspunkt soll die Geometrie einen Winkel aufweisen, der um  $90^\circ$  gegenüber dem Winkel im Startpunkt verdreht ist. Anhand der ermittelten Krümmungsrichtung wird auch die Richtung der Verdrehung für den Hilfspunkt bestimmt. Im vorliegenden Fall ist die Krümmungsrichtung beliebig und wird hier mit einer Linkskrümmung festgelegt. Der

aufgespannte Winkel von  $45^\circ$  zwischen Startvektor und Richtungsvektor zum Hilfspunkt ermöglicht das Einsetzen einer symmetrischen Verbundkurve. In Bild „III“ ist diese Verbundkurve in Rot eingezeichnet. Im nächsten Schritt startet die Schnittpunktanalyse aus dem ehemaligen Hilfspunkt. Bild „IV“ zeigt, dass der weiß markierte Schnittpunkt nun vom Typ „nn“ ist. Das weitere Vorgehen für diesen Anwendungsfall wird in dem zugehörigen Abschnitt erläutert.

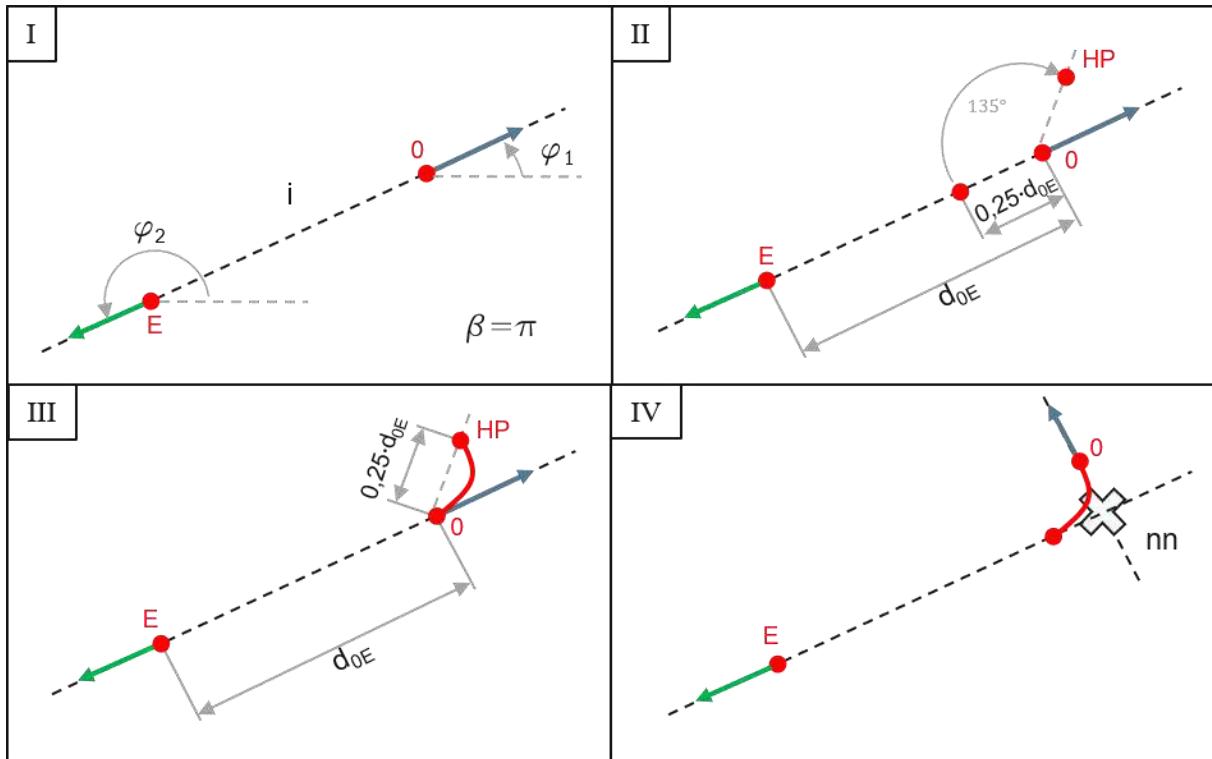


Abb. 4-8: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „i“ und der Fall, dass  $\beta = \pi$  ist

Für den Fall, dass  $\beta = 0$  ist, gibt es grundsätzlich noch zwei weitere Varianten. Unterschieden werden die Fälle aus Abb. 4-9 und Abb. 4-10 (jeweils Bild „I“), bei denen entweder der Startvektor auf den Endvektor zeigt oder anders herum. Für die Differenzierung dieser beiden Fälle wird ein zweiter Schnittpunkt betrachtet. In Abb. 4-9 Bild „II“ ist dargestellt, dass für den zweiten Schnittpunkt der Startvektor um  $90^\circ$  in positive Drehrichtung gedreht wird. Dadurch entsteht der weiß markierte Schnittpunkt „Op“. Unter den Bedingungen, dass der Schnittpunkt zunächst „i“ und dann „Op“ ist, wird der Hilfspunkt nach dem gleichen Prinzip wie im Fall von Abb. 4-8 gebildet. Diese Schritte sind in Bild „III“ und „IV“ der Abb. 4-9 dargestellt.

Zeigt der Startvektor auf den Endvektor, so entsteht durch das Drehen des Startvektors um  $90^\circ$  in positive Richtung ein Schnittpunkt der Art „On“, siehe Abb. 4-10 Bild „II“. In diesem Fall wird kein Hilfspunkt benötigt und die Punkte können durch eine Gerade verbunden werden. Dargestellt ist dies durch Bild „III“ der Abbildung.

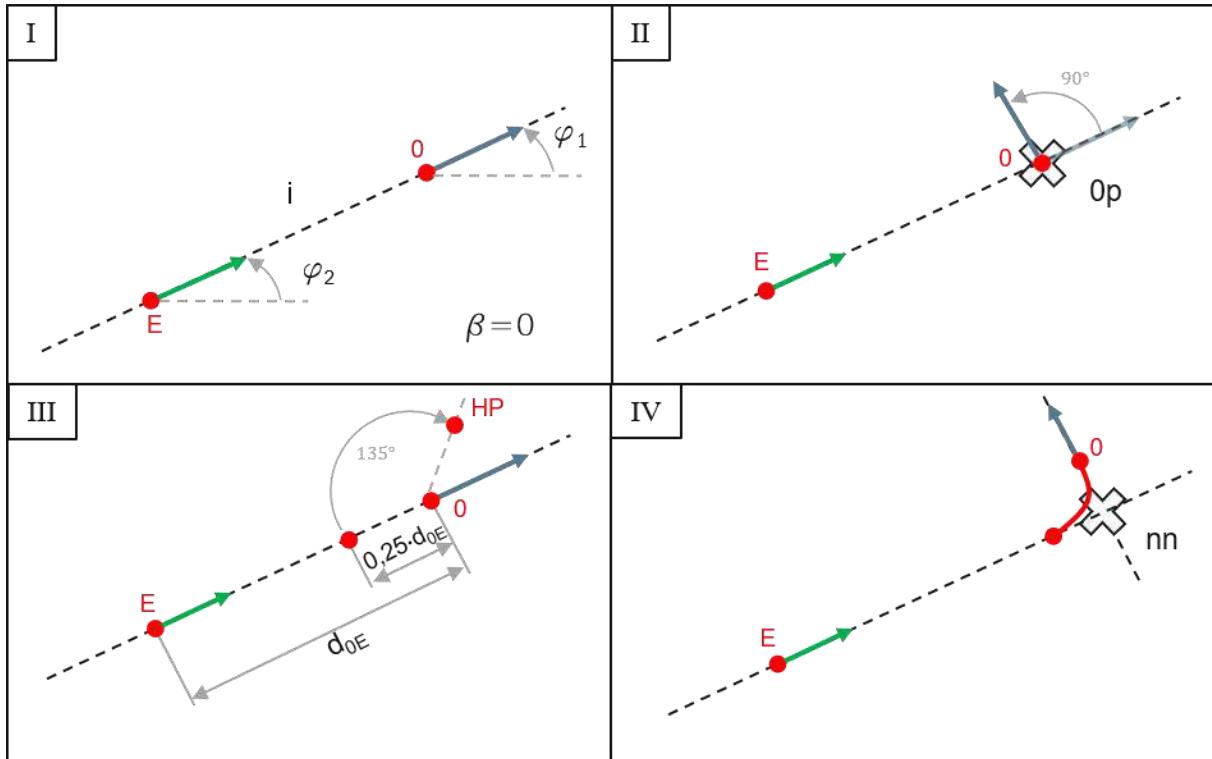


Abb. 4-9: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „i“ und der Fall, dass  $\beta = 0$  ist und der zweite Schnittpunkt „Op“ lautet

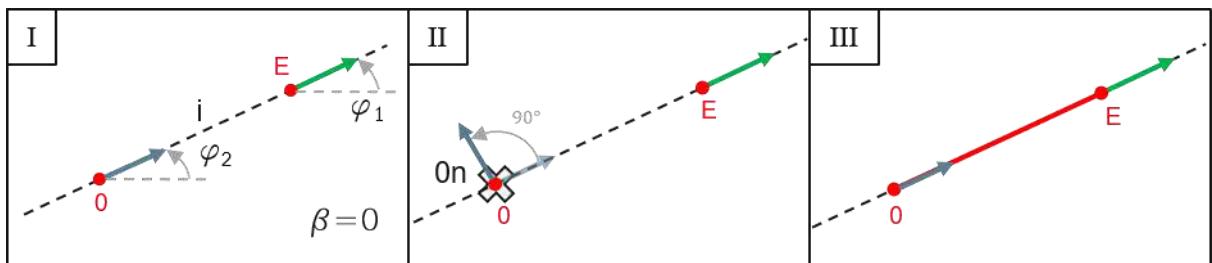


Abb. 4-10: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „i“ und der Fall, dass  $\beta = 0$  ist und der zweite Schnittpunkt „On“ lautet

### Schnittpunkt „p“:

Besitzen zwei Vektoren keinen Schnittpunkt, so sind diese zueinander parallel. Für die Verbindung der beiden Straßenenden, wird zunächst unterschieden, ob die Vektoren in dieselbe oder in entgegengesetzte Richtung zeigen. Diesbezüglich wird erneut der Relativwinkel  $\beta$  genutzt, wobei hier die gleiche Differenzierung wie für den Schnittpunkttypen „i“ vorgenommen wird. Um die genaue Lage der Vektoren zueinander herauszufinden, wird der Startvektor um  $90^\circ$  in positive Richtung gedreht und anschließend der Schnittpunkt bestimmt.

Generell gilt für die Schnittpunktart „p“, dass der Schnittpunkt zwischen dem gedrehten

Startvektor und dem Endvektor die Krümmungsrichtung der Verbundkurve vorgibt. Ist der zweite Schnittpunkt vom Typ „pX“, also „pp“, „pn“ oder „p0“, so liegt eine Linkskrümmung vor. Entspricht dieser Schnittpunkt allerdings dem Typen „nX“, wird die Verbundkurve rechtsgekrümmt ausgeführt.

In Abb. 4-11 ist der Fall  $\beta = 0$  dargestellt. In Bild „I“ der Abbildung ist der Ausgangszustand zu erkennen. Die Drehung des Startvektors liefert den in Bild „II“ dargestellten Schnittpunkt „pn“. In diesem Fall ist die Art des zweiten Schnittpunktes irrelevant und das weitere Vorgehen für alle anderen Fälle identisch. Von Relevanz ist allerdings der Abstand zum Schnittpunkt, der in Bild „III“ durch die Variable  $h$  dargestellt wird. Betrachtet wird die Drehung eines Viertels des Abstandes  $h$  um  $45^\circ$  in Richtung des ursprünglichen Startvektors. Verbunden werden Start- und Hilfspunkt durch eine Verbundkurve, die im Hilfspunkt einen Winkel besitzt, der um  $90^\circ$  zum Startwinkel in positive Richtung verdreht ist. In Bild „IV“ wird dann erneut der Schnittpunkt mit dem Vektor des neuen Startpunktes und dem Endvektor analysiert. Abhängig von der Art des Schnittpunktes wird das weitere Vorgehen in dem jeweiligen Abschnitt beschrieben.

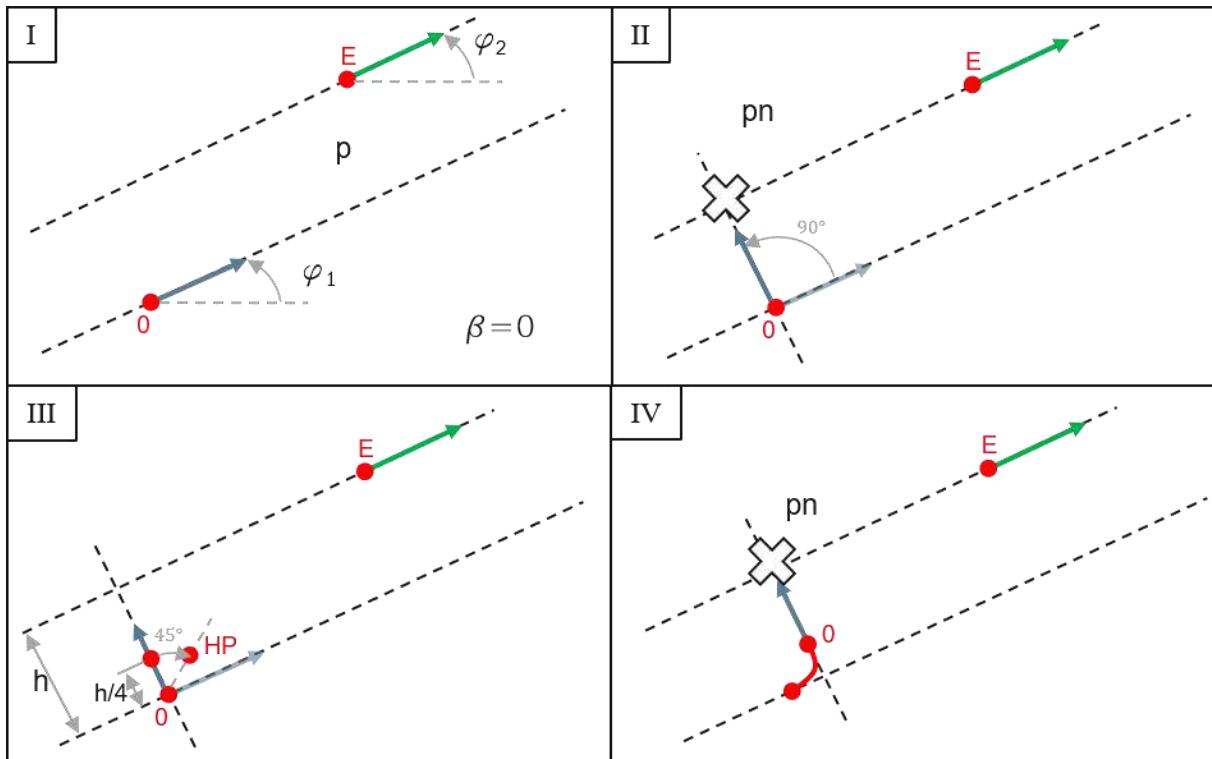


Abb. 4-11: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „p“ und der Fall, dass  $\beta = 0$  ist

Hat der Relativwinkel  $\beta$  den Wert Null, so ist eine weitere Differenzierung vorzunehmen. Betrachtet wird zunächst der Fall aus Abb. 4-12 Bild „I“. Das Drehen des ersten Vektors liefert die Schnittpunktart, mit der die Unterscheidung möglich ist. Diese können in zwei Gruppen unterteilt werden, für die die Vorgehensweise jeweils gleich ist. Liegt ein Schnittpunkt „p0, pn, np, n0“ (wie in Bild „II“) vor, so wird genau wie im vorherigen Fall für  $\beta = 0$  ein Viertel des

Abstandes  $h$  um den Startpunkt gedreht und für die Ermittlung des Hilfspunktes genutzt, siehe Bild „III“. In Bild „IV“ ist in rot die eingesetzte Verbundkurve dargestellt, wobei diese auch hier im Hilfspunkt eine um  $90^\circ$  zum Startwinkel verdrehte Richtung besitzt.

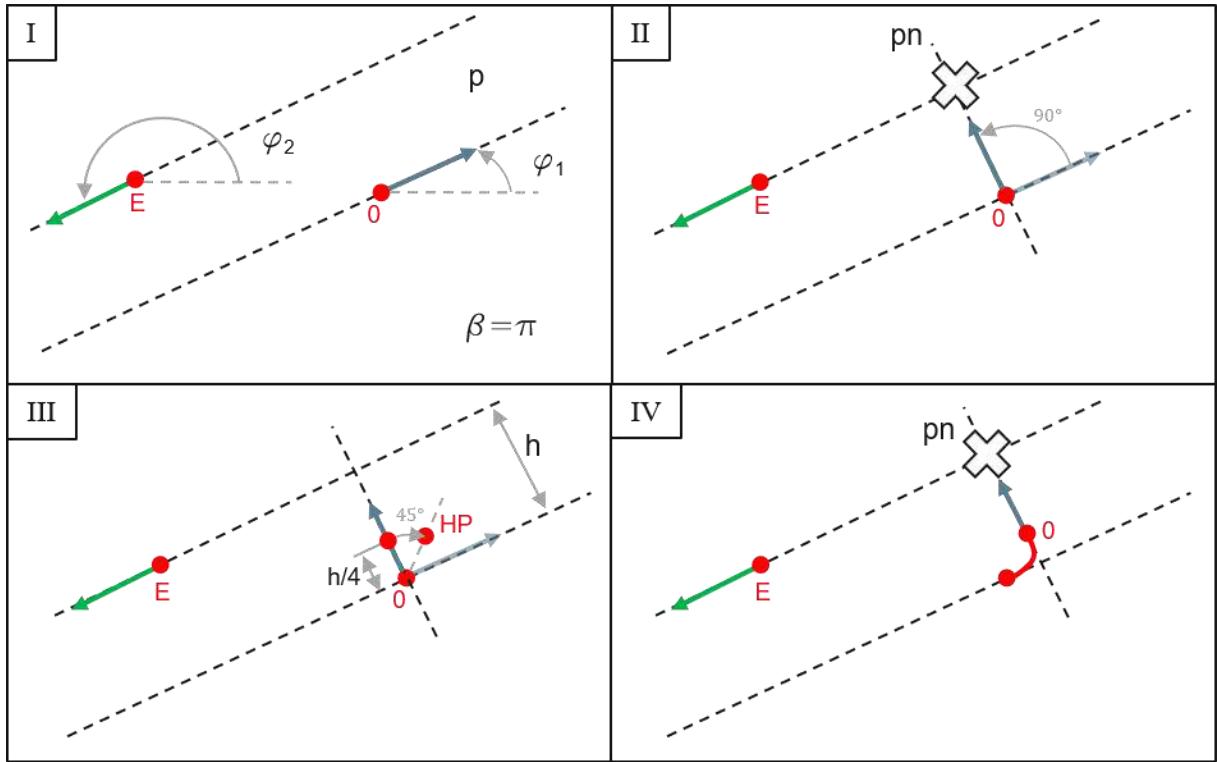


Abb. 4-12: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „p“ und der Fall, dass  $\beta = \pi$  ist und der zweite Schnittpunkt „p0, pn, np, n0“ lautet

Liegt nach der Drehung des Startvektors ein Schnittpunkt der zweiten Gruppe vor, also „pp“ oder „nn“, so beschreiben die Bilder aus Abb. 4-13 die Vorgehensweise zur Ermittlung des Hilfspunktes und der Geometrie. In Bild „II“ ist beispielhaft der Fall mit dem Schnittpunkt „pp“ dargestellt. Im nächsten Schritt wird nun der Endvektor um  $90^\circ$  in dessen positive Richtung gedreht. Der entstehende Schnittpunkt zwischen dem Startvektor und dem gedrehten Endvektor entspricht der Lage des Hilfspunktes, siehe Bild „III“ (Die Art des Schnittpunktes hat hier keine Bedeutung). Verknüpft werden Start- und Hilfspunkt durch eine Gerade, da die Geometrie im Hilfspunkt denselben Winkel wie im Startpunkt aufweisen soll. Wird anschließend die Schnittpunktnanalyse aus dem neuen Startpunkt durchgeführt, so sind die Vektoren wieder parallel und besitzen auch einen Relativwinkel von  $180^\circ$ . Die Ausgangssituation ist somit dieselbe, wie vor der Ermittlung des Hilfspunktes. Eine Drehung des Startvektors erzeugt allerdings einen Schnittpunkt vom Typ „p0“, sodass hier eine Zuordnung zu einem anderen Fall vorliegt und dementsprechend die weitere Vorgehensweise vorgegeben ist.

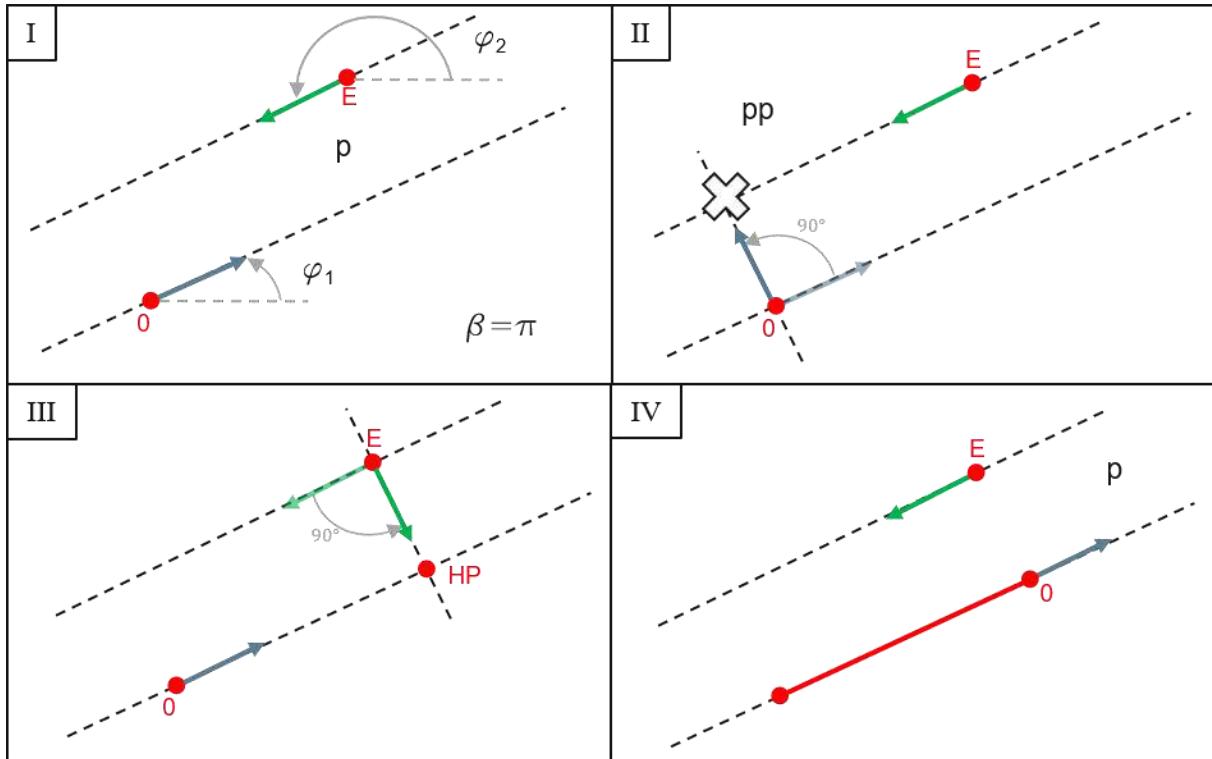


Abb. 4-13: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „p“ und der Fall, dass  $\beta = \pi$  ist und der zweite Schnittpunkt „pp, nn“ lautet

#### Schnittpunkt „00“:

Der Schnittpunkttyp „00“ beschreibt einen trivialen Fall, da die Punkte bereits aufeinander liegen und keine Verbindungsstrecke zwischen ihnen notwendig ist. Somit ist die Funktion in diesem Fall überflüssig. Über diese Schnittpunktart lässt sich allerdings die Aussage treffen, dass die Straße in diesem Punkt einen Knick aufweist und somit der Winkel- und Krümmungsverlauf an dieser Stelle nicht den Anforderungen entspricht.

#### Schnittpunkt „np“, „pp“, „nn“, „0n“, „p0“, „n0“ und „0p“:

Liegt, wie in Abb. 4-14 Bild „I“ ein Schnittpunkt vom Typ „np“ vor, so ist immer ein Hilfspunkt zur Konstruktion der Straße notwendig. In Bild „II“ sind die zur Ermittlung notwendigen Größen dargestellt. Genutzt wird ein Viertel des Abstandes  $d_{0E}$  zwischen Start und Endpunkt. Dieser Teil der Strecke wird dann um den Startpunkt in Richtung des Startvektors gedreht, sodass der Richtungsvektor des Hilfspunktes mit dem Startvektor einen Winkel von  $45^\circ$  aufspannt. Die Verbindung wird durch eine Verbundkurve realisiert und der Winkel im Hilfspunkt ist gegenüber dem Startwinkel um  $90^\circ$  in Krümmungsrichtung verdreht, siehe Bild „II“. Im letzten Bild der Abbildung wird aus der neuen Startposition der Schnittpunkt analysiert, wobei das weitere Vorgehen in Abhängigkeit der Art des Schnittpunktes im zugehörigen Abschnitt erläutert wird.

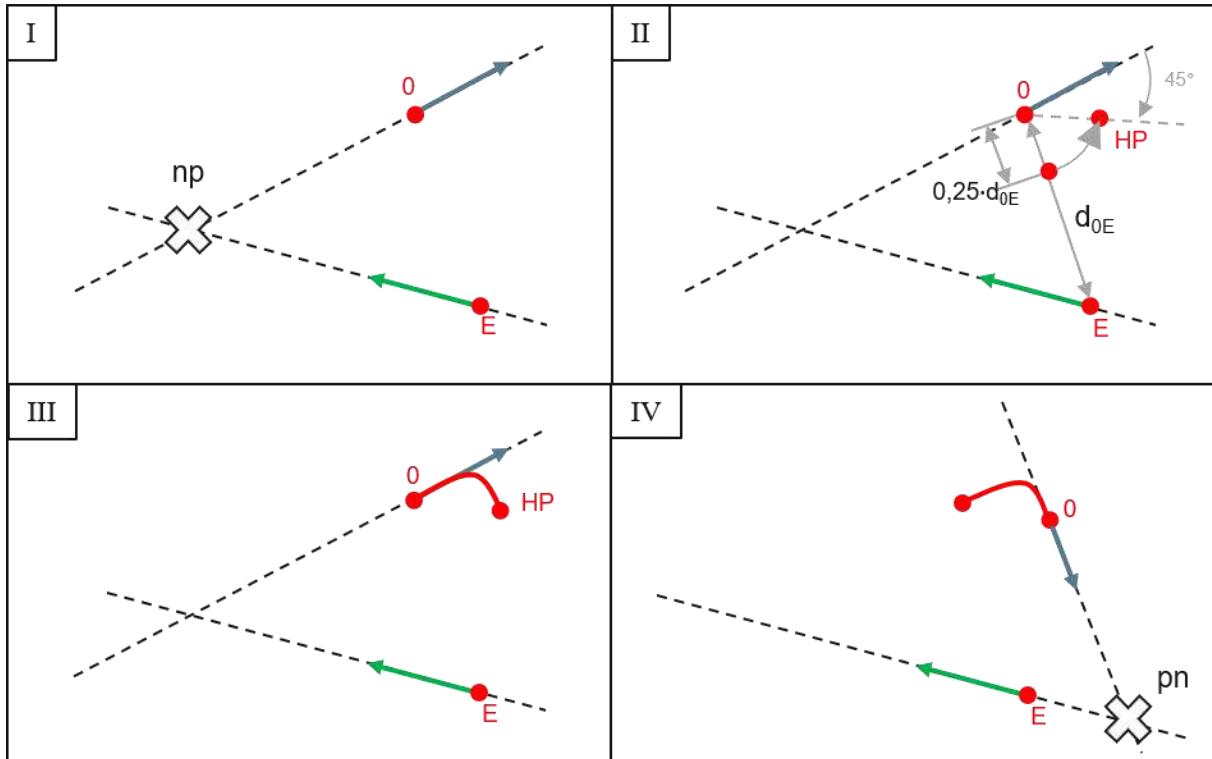


Abb. 4-14: Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „np“

Für die Schnittpunktarten „pp“, „nn“, „On“, „p0“, „n0“ und „Op“ lässt sich der Straßenverlauf analog zu dem zuvor erläuterten Verfahren ermitteln. Ein Viertel des Abstandes zwischen Start- und Endpunkt wird um den Startpunkt gedreht, sodass der Winkel zwischen Startvektor und dem des Hilfspunktes  $45^\circ$  beträgt. Der Winkel spannt sich dabei immer in Krümmungsrichtung auf, sodass der Hilfspunkt vom Startvektor aus in Krümmungsrichtung liegt. Die Verbindung wird in diesen Fällen immer durch eine Verbundkurve realisiert, wobei der Winkel im Hilfspunkt stets um  $90^\circ$  zum Startwinkel in Krümmungsrichtung verdreht ist.

Zur Bestimmung der Krümmungsrichtung für die Schnittpunkttypen „p0“ und „n0“ wird zusätzlich die Betrachtung des Relativwinkels herangezogen. Liegt der Winkel im Bereich von  $\pi \mp k \cdot 2\pi > \beta > 0 \mp k \cdot 2\pi$  mit  $k \in \mathbb{Z}$ , so besitzt die Verbundkurve zum ersten Hilfspunkt eine Rechtskrümmung. Hingegen besitzt die Verbundkurve für  $\pi \mp k \cdot 2\pi < \beta < 2\pi \mp k \cdot 2\pi$  mit  $k \in \mathbb{Z}$  eine Linkskrümmung.

Theoretisch wird die Lage des ersten Hilfspunktes für jede Schnittpunktart individuell ermittelt. Entsprechend der Ausgangssituation wird nach ermitteltem Hilfspunkt die neue Situation analysiert und Fall für Fall abgearbeitet. Grundsätzlich werden alle Ausgangssituationen solange durch Hilfspunkte erweitert, bis entweder der Fall „pn“ vorliegt und der Start- und Endpunkt somit durch eine Verbundkurve verknüpft wird oder das Schließen des Straßennetzes im Fall „i“ durch eine Gerade erfolgt.

Ein weiteres Feature dieser Funktion ist die Definition von Sperrflächen. Die Bedeutung dieser Flächen wird anhand von Abb. 4-15 an einem Extremfall genauer erläutert. In Bild (a) ist in schwarz ein beispielhaftes Straßennetz dargestellt. Unter Anwendung der Funktion zum Schließen der Straßenenden sollen die roten Punkte verbunden werden. Nach den bisherigen Features der Funktion werden die Straßenenden durch die in gelb dargestellte Straße verbunden. In diesem Fall würde die Straße das erstellte Straßennetz schneiden. Um dies zu vermeiden, wird eine Sperrfläche definiert, die das Straßennetz umspannt. Die Sperrfläche ist ein Polygon, das aus beliebig vielen Punkten zusammengesetzt werden kann. Ausschlaggebend für das aufspannen des Polygons sind die äußeren Punkte des Straßennetzes, in Bild (b) rot dargestellt. Bei der Erstellung der Hilfspunkte muss somit immer geprüft werden, ob die Sperrfläche geschnitten wird. Dementsprechend müssen die Hilfspunkte gegebenenfalls angepasst werden, sodass in dem Beispiel der grüne Straßenverlauf erstellt wird.

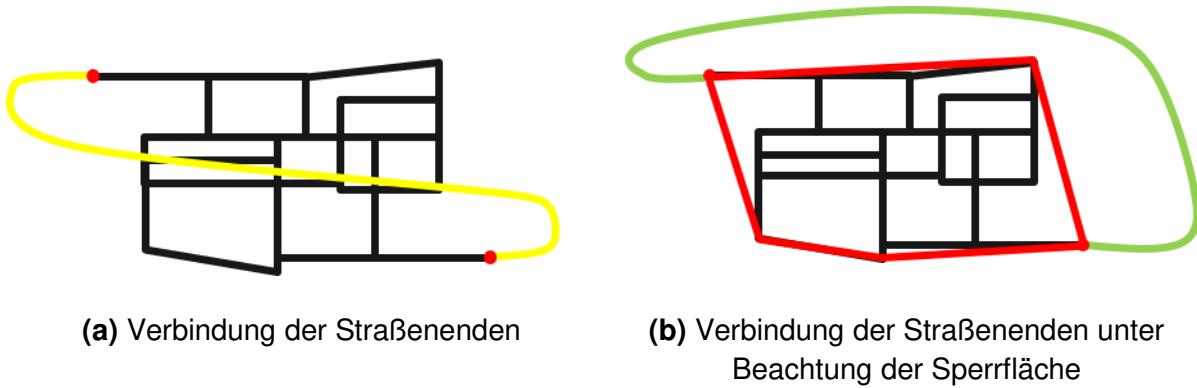


Abb. 4-15: Beispielhafter Straßenverlauf zur Verbindung zweier Straßenenden unter Beachtung der Sperrfläche

## 4.2 Definition des Höhenverlaufs

Die bisherigen Angaben zur Definition des Straßennetzes beschreiben lediglich die Lage in der xy-Ebene, also der Draufsicht. Im nächsten Schritt werden der erstellten Referenzlinie Höhendaten zugeordnet. Betrachtet wird der Längsschnitt der Referenzlinie im mitbewegten Koordinatensystem, also in der sz-Ebene. Die Zuweisung der Höhenpunkte findet analog zur realen Vorgehensweise aus Kap. 2.3.3.1 statt. In jedem Segment werden jeder Straße in Abhängigkeit ihrer Laufkoordinate  $s$  Höhenwerte zugewiesen. Die einzelnen Höhenpunkte werden durch Geraden verbunden. Damit keine Unstetigkeiten im Höhenverlauf vorliegen, werden die Schnittpunkte der Geraden mit Kreisen ausgerundet. Ähnlich zur realen Vorgehensweise erfolgt hier das Einsetzen von Kuppen und Wannen. Lediglich die Angabe des Radius reicht zur vollständigen Konstruktion einer Ausrundung aus, denn der Mittelpunkt eines Kreises wird auf die entsprechende Winkelhalbierende gelegt. Die Kreise werden dabei so positioniert, dass die beiden Geraden den Kreis tangieren. Durch die Angabe der

Höhenpunkte und der Ausrundungen entsteht somit eine Referenzlinie, die einem Kurvenverlauf im Raum entspricht.

### 4.3 Definieren des Straßenlayouts

Der nach dem bisherigen Konzept erstellte Straßenverlauf erzeugt eine Kurve im Raum. Im nächsten Entwicklungsschritt werden die linienförmigen Straßen zu einem Volumenkörper ausgebildet. Die Angaben zur Definition des Straßenlayouts findet für jede Straße des Segmentes individuell statt. Dafür werden zunächst jeder Referenzlinie Fahrstreifen, Seitenstreifen, Gehwege und weitere straßenzugehörige Wege in beiden Fahrtrichtungen zugewiesen. Die Fahrbahnen verlaufen entlang der Referenzlinie und werden über zugehörige Breiten definiert. Das Nummerieren der einzelnen Fahrbahnen durch Zahlen ermöglicht eine eindeutige Anordnung lateral zur Referenzlinie. Dabei werden diese chronologisch von der Referenzlinie aus, die den Wert Null besitzt, angeordnet. Die Fahrbahnen werden so positioniert, dass die nächste Fahrbahn an das laterale Ende der vorherigen Fahrbahn angesetzt wird. Die Nummerierung findet hier analog zu OpenDRIVE statt, d.h. dass die Wege in positiver t-Richtung mit positiven ganzen Zahlen und die in negativer Richtung mit negativen Zahlen nummeriert werden. Zusammengefasst lassen sich somit drei Gruppen von Fahrbahnen definieren: Zum einen die Gruppe der Referenzlinie, der keine Spuren zugeordnet werden, sondern die aus einer Mittellinie besteht. Zum anderen gibt es die Gruppe der linken und rechten Spuren, die alle Fahrbahnen umfassen, die sich auf der jeweiligen Seite der Referenzlinie befinden. Dabei beschreibt die rechte Seite der Referenzlinie den Bereich in negativer t-Richtung. Jeder erstellten Fahrbahn können anschließend individuell weitere Eigenschaften zugewiesen werden. Diese umfassen Markierungen, Straßendicken und Informationen zum Werkstoff der Straße. Dabei wird durch das Material definiert, welche Reibwerte und Oberflächenrauheiten vorliegen. Durch die Angabe eines Straßentyps, der in Deutschland durch die Arten der Spielstraße, Stadtstraße, Landstraße und Autobahn differenziert wird, kann der Straße ein Geschwindigkeitslimit zugewiesen werden. Des Weiteren hilft die Kategorisierung bestimmte Parameter einzuschränken und gewisse Voreinstellungen zu treffen.

Um das Straßenlayout zu vervollständigen, wird in diesem Kapitel erläutert, wie der Straßenquerschnitt, die Linienführung in Knotenpunkten und eine Spurerweiterung bzw. -verringerung erstellt wird. Anschließend erfolgt eine Erläuterung zur Erstellung und Positionierung von stationären und quasi-stationären Objekten. Nach diesem Kapitel ist das entwickelte Konzept zur Erstellung eines Straßennetzes vollständig beschrieben.

#### 4.3.1 Straßenquerschnitt

Der Querschnitt beschreibt die Fläche, die durch einen Schnitt senkrecht zur Referenzlinie entsteht. Dabei gilt es, die Anforderungen zur Erstellung eines realen Querprofils sowie dessen Verdrehung aus Kap. 2.3.3 zu realisieren. Die Verdrehung erfolgt analog zum realen Vorgehen durch die Angabe eines Winkels. Dieser beschreibt die Drehung der Fahrbahnfläche gegenüber der st-Ebene. Gedreht wird um die Referenzlinie, allerdings ist durch die Angabe eines t-Offsets eine Verschiebung der Drehachse möglich. Zur Erstellung des Querprofils

werden parametrierbare Dreiecke zusammengesetzt. Abb. 4-16 zeigt die notwendigen Parameter zur vollständigen Definition eines Dreieck- bzw. eines Dachprofils. Durch zwei definierte Punkte lässt sich ein lineares Querprofil erzeugen. Die Punkte werden in Bezug zum mitbewegten Koordinatensystem definiert, wobei ein Punkt durch jeweils einen Wert in z-Richtung und einen in t-Richtung genau definiert ist. In Bild (a) der Abbildung ist das Dreiecksprofil durch die Punkte  $P_1$  und  $P_2$  genau bestimmt. Der Punkt  $P_1$  hat die Koordinaten  $(t_1|h_1)$  und der Punkt  $P_2$   $(t_2|h_2)$ , wobei der Wert  $t_2 < 0$  und  $h_2 = 0$  ist. In Bild (b) ist ein Dachprofil dargestellt, das sich aus konstruktiver Sicht aus zwei Dreiecksprofilen zusammensetzt. Dementsprechend werden vier Punkte benötigt, um ein Dachprofil zu erstellen, wobei die beiden Punkte an der Schnittstelle übereinstimmen müssen. In diesem Fall liegen die Punkte  $P_2$  und  $P_3$  aufeinander und besitzen dieselben Koordinaten.

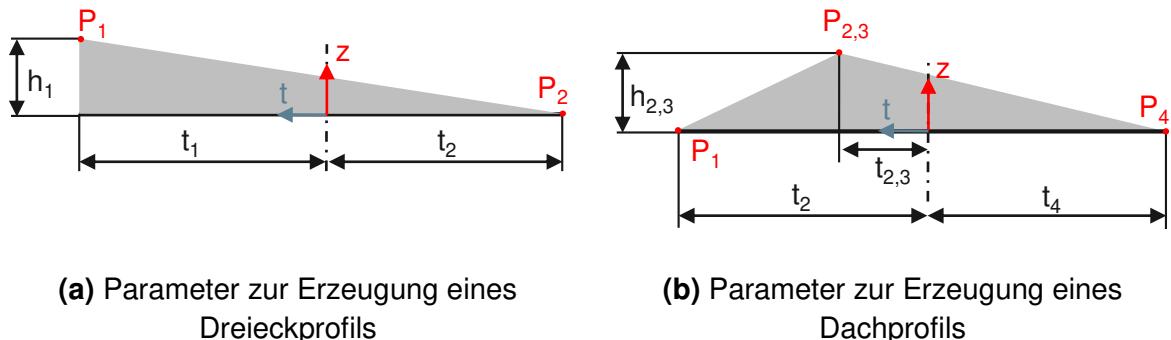


Abb. 4-16: Arbeitsschritte zur Erzeugung von linearen Querprofilen

Als Erweiterung zu den beiden realen Querprofilen gibt es die Möglichkeit, nicht lineare Querprofile zu erzeugen. Diese Erweiterung umfasst quadratische und kubische Verläufe in laterale Richtung. Zur Erstellung von quadratischen Verläufen werden drei Stützstellen benötigt. Neben der Angabe von Stützstellen können auch die Steigungen des Polynoms an bestimmten Stellen genutzt werden. Das in Abb. 4-17 vorliegende quadratische Querprofil setzt sich zum einen aus den Punkten  $P_1$  und  $P_2$  zusammen. Zum anderen ist durch die rot gestrichelte Linie die Steigung des Polynoms für den Wert  $t = 0$  angegeben, wobei auch die Steigung in diesem Punkt den Wert Null besitzt.

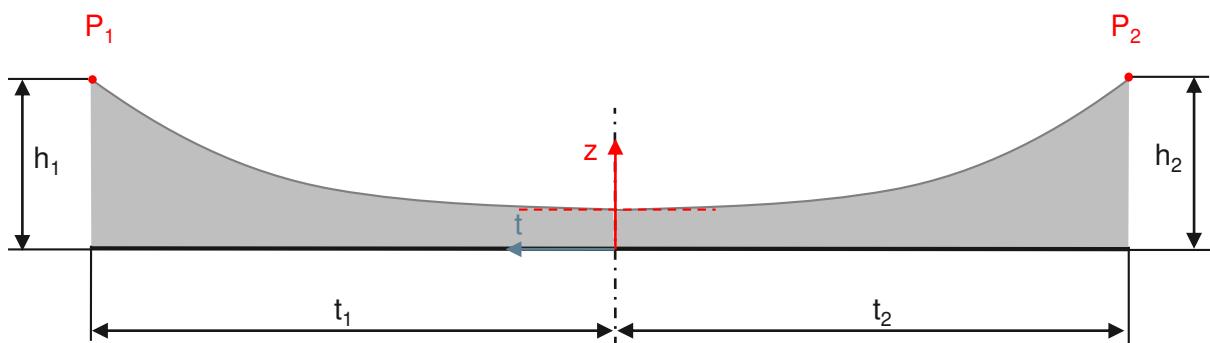


Abb. 4-17: Angaben zur Erzeugung eines quadratischen Querprofils

Die eindeutige Erstellung eines kubischen Polynoms erfordert Informationen über vier Stützstellen. Das Beispiel aus Abb. 4-18 setzt sich aus den Punkten  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  sowie der Steigung im Punkt  $P_3$  zusammen. Durch Vorgabe des Polynomgrades und der zugehörigen Stützstellen können ähnlich zum Dachprofil auch unterschiedliche Querprofile miteinander verknüpft werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Punkte an den Übergängen übereinstimmen und keine Lücken oder Sprünge im Querprofil entstehen.

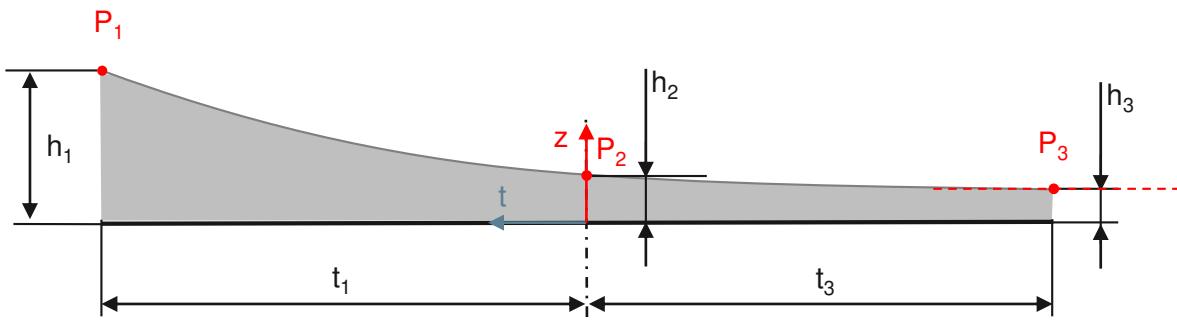


Abb. 4-18: Angaben zur Erzeugung eines kubischen Querprofils

Ein Querprofil wird für jede Straße an einer bestimmten Position der Referenzlinie zugewiesen. Das erstellte Profil besitzt somit Gültigkeit bis ein neues Profil definiert wird. Erfolgt ein Wechsel des Querprofils entlang einer Straße, also eine Verwindung der Fahrbahn, so wird über eine Verwindungslänge  $s_v$  (Bezogen auf das mitbewegte Koordinatensystem) angegeben, über welche Strecke sich die Querschnitte angleichen sollen. Die Anpassung der Querprofile erfolgt hier ohne die Angabe von zusätzlichen Parametern über einen linearen Zusammenhang, denn durch die gegebenen Start- und Endpunkte der Querprofile und der Verwindungslänge ist der lineare Verlauf zum Angleich der Profile vollständig bestimmt.

### 4.3.2 Spurbreitenveränderung

Eine Veränderung der Spurbreite entlang der Referenzlinie wird über ein Polynom dritten Grades beschrieben. Hauptsächlich findet sich dieser Verlauf beim Hinzufügen oder Wegfallen einer Spur wieder.

Zur vollständigen Beschreibung eines solchen Polynoms sind grundsätzlich vier Stützstellen notwendig. Das Vorgehen zur Bestimmung dieser Stützstellen wird anhand von Abb. 4-19 genauer erläutert. In Bild (a) wird durch die schwarze Linie der Verlauf der Spurbreitenzunahme beschrieben. Die gestrichelte schwarze Linie stellt die Grenze zur Nachbarspur dar. Die roten Punkte sowie die rot gestrichelten Linien dienen zur Bestimmung des Polynoms. Dabei beschreiben die Punkte die Start- und Endkoordinaten des Polynoms und die Linien die Steigung in diesen Punkten. Zur einfacheren Ermittlung der Stützstellen wird das Polynom in Abhängigkeit vom mitbewegten Koordinatensystem beschrieben. Für das Hinzufügen einer Spur wird zunächst der Startpunkt in s-Richtung angegeben. Die Koordinate in t-Richtung ist die Außenkante der letzten Spur und somit die Aufsummierung der bisherigen

Spurbreiten von der Referenzlinie aus. Zur Bestimmung der s-Koordinate des Endpunktes ist die Angabe einer Strecke  $ds_1$  erforderlich. Diese beschreibt, über welche Länge sich die neue Spur aufbauen soll, siehe Bild (a) der Abbildung. Die t-Koordinate ergibt sich aus dem Wert des Startpunktes aufsummiert um die vollständige Breite der neuen Spur. Zwei weitere Bedingungen ergeben sich durch die Steigungen in diesen Punkten, wobei zu beachten ist, dass das Polynom an diesen Schnittstellen dem ursprünglichen Straßenverlauf gleichen muss. Eine Betrachtung aus dem mitbewegten Koordinatensystem ergibt, dass die Steigungen in Start- und Endpunkt Null sind, da der Streckenverlauf parallel zur Referenzlinie verläuft. Zusammengefasst lässt sich das Polynom zur Beschreibung der Spurbreitenveränderung bei bekanntem Startpunkt durch die Angabe der neuen Spurbreite und einer Länge, über die sich die neue Spur aufbauen soll, eindeutig konstruieren.

Des Weiteren kann eine Spurbreitenveränderung durch eine Sperrfläche erweitert werden. Dafür wird zunächst ein zweites Polynom definiert, sodass beide Polynome eine Fläche eingrenzen, die der Sperrfläche entspricht. Das zweite Polynom wird ausgehend vom Startpunkt des ersten Polynoms über einen Versatz  $s_{Offset}$  und eine Strecke  $ds_2$ , über die sich das zweite Polynom erstrecken soll, erstellt. Die t-Koordinate ist für beide Polynome identisch, da diese auf denselben Spurbreite münden. Dargestellt ist dies in Abb. 4-19 Bild (b), wobei die Markierungen der Sperrfläche über eine Zeichenummer angegeben wird, was in Kap. 4.3.4 genauer erläutert wird.

Die Konstruktion für den Wegfall einer Spur unterliegt dem gleichen Prinzip, wobei die Fahrbahnbreite über eine angegebene Strecke abgebaut wird.

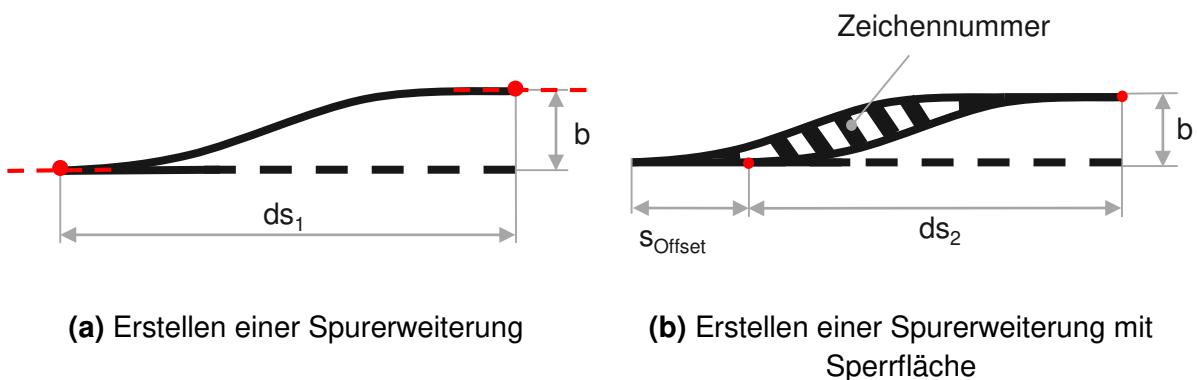


Abb. 4-19: Notwendige Parameter zur Erstellung einer Spurerweiterung mit und ohne Sperrfläche

Die Referenzierung auf das mitbewegte Koordinatensystem ermöglicht durch die Angabe der zuvor genannten Parameter eine Erstellung unabhängig vom Straßenverlauf. So ist in Abb. 4-20 eine Spurerweiterung in der Kurve dargestellt. In grün ist das mitbewegte Koordinatensystem auf der Referenzlinie in zwei Positionen zu sehen. Das linke Koordinatensystem in der Abbildung liegt im Startpunkt und das Rechte um  $ds_1$  versetzt im Endpunkt. Anhand der Orientierung der Koordinatensysteme ist zu erkennen, dass in Start-

und Endpunkt die Steigungen des Polynoms Null sind, da das Polynom an diesen Stellen immer parallel zur Referenzlinie verläuft.

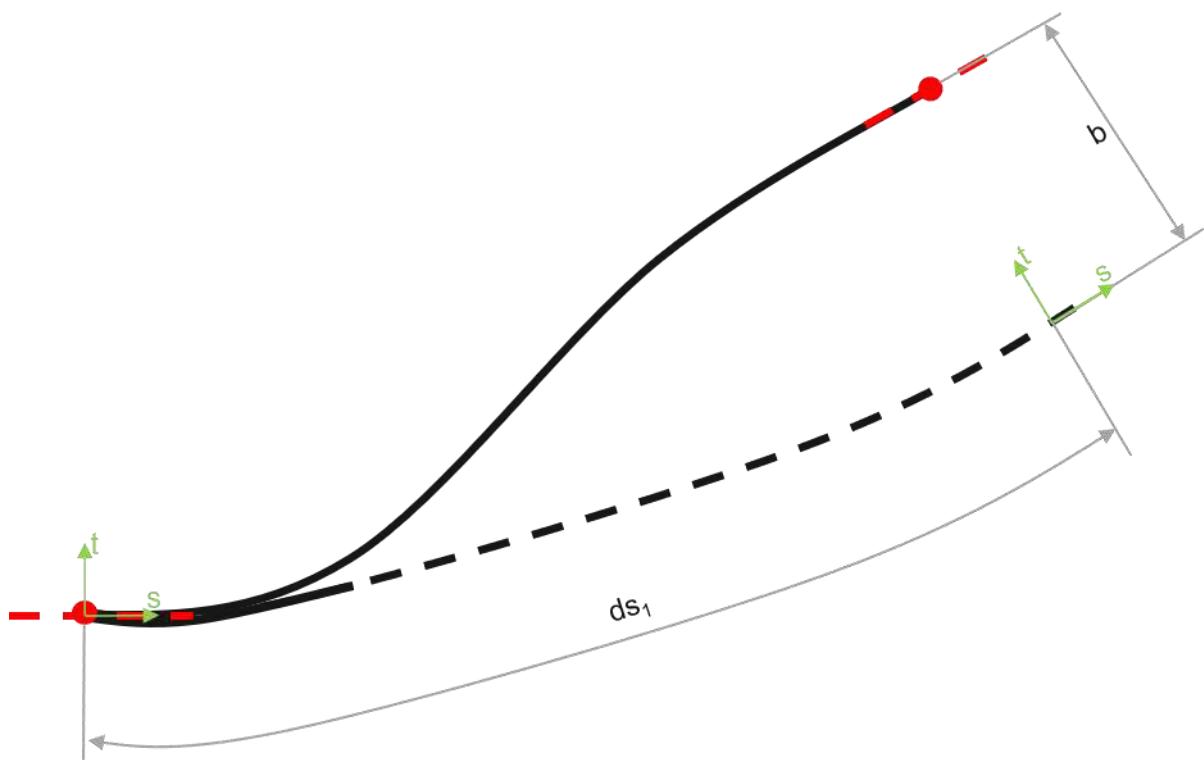


Abb. 4-20: Darstellung einer Spurerweiterung in der Kurve

#### 4.3.3 Linienführung in Knotenpunkten

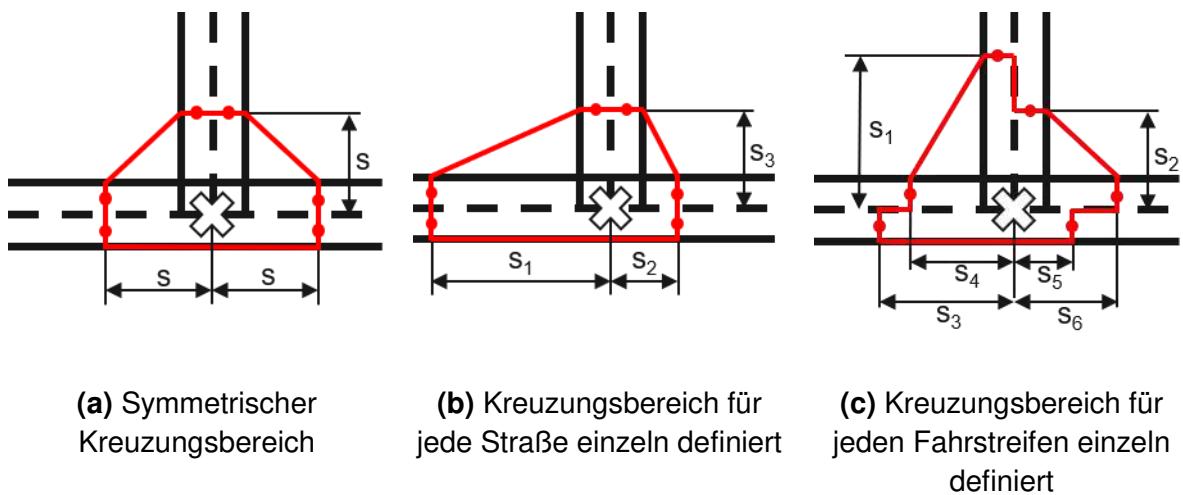


Abb. 4-21: Drei verschiedene Varianten zur Bestimmung des Kreuzungsbereiches in Knotenpunkten am Beispiel einer T-Kreuzung

Um die Linienführung in einem Knotenpunkt genau definieren zu können, muss zunächst ein Kreuzungsbereich angegeben werden. Dieser repräsentiert das Feature der Schnittstelle aus Kap. 3.2 und umfasst alle Verbindungsstraßen in einem Knotenpunkt. Zum einen werden Fahrstreifen an den Schnittstellen der Konfliktzonen aufgeteilt und zum anderen werden sie zusammengeführt. Dadurch ist die Spurführung nicht mehr eindeutig und es entstehen Überlagerungen der Fahrspuren, sogenannte Konfliktzonen.

Zur Definition des Kreuzungsbereiches gibt es grundsätzlich drei verschiedene Varianten, mit denen dessen Grenzen bestimmt werden können. In Abb. 4-21 sind diese Varianten dargestellt. Bild (a) zeigt den symmetrischen Fall. Hierbei wird die Länge  $s$  in alle Richtungen der Referenzlinie vom Schnittpunkt aus angetragen. Dadurch werden die äußeren Begrenzungen des Kreuzungsbereiches bestimmt, die in der Abbildung durch die roten Linien dargestellt sind. Die roten Kreise stellen die Schnittpunkte der äußeren Begrenzung des Kreuzungsbereiches mit den Mittellinien der einzelnen Fahrspuren dar. Diese beschreiben die Verknüpfungsstellen zwischen dem ursprünglichen Fahrstreifen und der Verbindungsstraße. Eine Verbindungsstraße wird immer zwischen zwei roten Punkten erstellt.

Neben dem symmetrischen Fall gibt es auch zwei verschiedene unsymmetrische Ausführungen des Kreuzungsbereiches. In Bild (b) werden die Grenzen des Kreuzungsbereiches vom Kreuzungsmittelpunkt aus in jede Straßenrichtung einzeln angegeben. Diese sind hier durch die Längen  $s_1$  bis  $s_3$  dargestellt.

Die dritte Variante in Bild (c) beschreibt den höchsten Detailierungsgrad zur Definition des Kreuzungsbereiches, da für jeden einzelnen Fahrstreifen aller Straßen individuell die Grenze des Bereiches definiert werden kann. Dadurch kann eine exakte Spurführung im Kreuzungsbereich realisiert und so die Unterschiede zwischen einer Links- und Rechtsabbiegerspur konstruktiv dargestellt werden. Zur vollständigen Definition dieses Kreuzungsbereiches im Vergleich zu einem Symmetrischen werden allerdings auch mehr Informationen benötigt. So benötigt eine Kreuzung aus Bild (c) die Angaben der Längen  $s_1$  bis  $s_6$ .

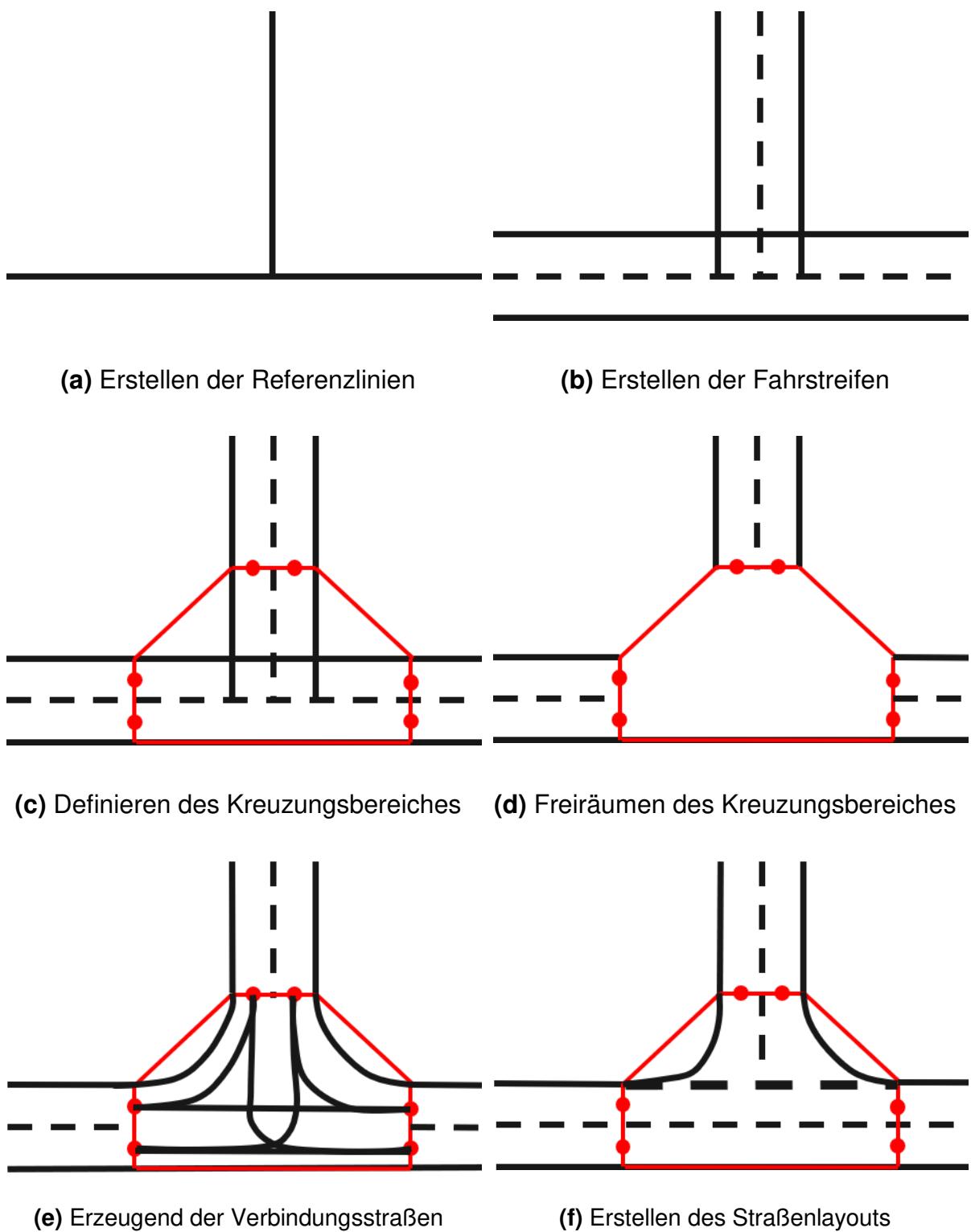


Abb. 4-22: Arbeitsschritte zur Erstellung der Linienführung in Knotenpunkten am Beispiel einer T-Kreuzung

Nach Angabe des Kreuzungsbereichen und den daraus resultierenden Verknüpfungsstellen der Fahrstreifen können nun die Verbindungsstraßen für den Kreuzungspunkt erstellt werden.

Erläutert wird das Vorgehen ausgehend von der Referenzlinie bis zur vollständig beschriebenen Spurführung einer Kreuzung anhand von Abb. 4-22. In Bild (a) sind die Referenzlinien des Segmentes einer T-Kreuzung dargestellt. Das Vorgehen zur Erstellung solch eines Segmentes ist in Kap. 4.1.1 erläutert. Für jede dieser Referenzlinien werden wie in Kap. 4.3 zu Beginn beschrieben Fahrstreifen definiert. In Bild (b) besteht die Kreuzung aus einer zweispurigen Haupt- und Nebenstraße. Anschließend wird der Kreuzungsbereich definiert. Grundsätzlich gibt es da die zuvor erläuterten Varianten, wobei die in Bild (c) eingegrenzte Fläche einen symmetrischen Kreuzungsbereich darstellt. Im nächsten Schritt wird zunächst der Inhalt dieses Bereiches gelöscht, d.h. dass die Straßen an den Grenzen des Kreuzungsbereiches aufgetrennt werden und der Teil innerhalb des Bereiches nicht mehr benötigt wird. Dargestellt ist dieser Prozessschritt in Bild (d), sodass nun die Verbindungspunkte von jeweils zwei Fahrstreifen verbunden werden. Um diese Verbindungsstraßen zu erzeugen gibt es drei Varianten, die sich in ihrem Detailierungsgrad unterscheiden.

In der ersten Option werden alle logischen und nach der Straßenverkehrsordnung zugelassene Verbindungsstraßen in einer Kreuzung automatisiert erstellt. Dafür wird die entwickelte Funktion aus Kap. 4.1.2.1 genutzt. So werden die Punkte mit einer Verbindungsstraße, die aus den Grundelementen der Gerade und der Verbundkurve besteht, verbunden. Zur Erstellung der Verbindungsstraßen werden somit keine weiteren Informationen benötigt, allerdings kann die genaue Spurführung auch nicht beeinflusst werden. Diese Option ist nach dem entwickelten Konzept das schnellste Erstellungsverfahren für eine Kreuzung und dient vor allem den Verkehrssimulationen, bei denen die genaue Fahrzeugroute von geringer Relevanz ist. Darunter fallen beispielsweise Verkehrsflusssimulationen eines gesamten Straßennetzes bzw. Tests von automatisierten Fahrfunktionen, die von der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Objekten abhängen.

Die zweite Variante zur Erstellung der Verbindungsstraßen ermöglicht volle Gestaltungsfreiheit. Für die Verbindung zweier Punkte wird eine individuelle Straße erzeugt. Dafür wird zunächst eine Referenzlinie, die sich aus den drei Trassierungsgrundelementen zusammensetzt definiert. Diese Variante stellt den höchsten Aufwand dar, da alle Informationen zum Erstellen einer eigenständigen Straße benötigt werden und für die Verbindung zweier Punkte jeweils eine Straße definiert werden muss. Vorteilhaft ist allerdings, dass der Straßenverlauf entsprechend dem Anwendungsfall erstellt und so eine exakte Straßenführung ermöglicht wird.

Mit der dritten Variante wird eine Methode zur Verfügung gestellt, die vom Detaillierungsgrad und Erstellungsaufwand zwischen die beiden bisherigen Varianten eingeordnet werden kann. Notwendig für die Verbindung zweier Punkte ist lediglich die Angabe eines Radius, der einen Kreisbogen bestimmt, mit dem die Verbindungsstraße erstellt werden kann. Dafür werden die offenen Straßenenden mit Geraden weitergeführt, wobei diese tangential an die bisherige Geometrie ansetzen. Die Geraden werden soweit fortgesetzt, bis die Enden durch den Kreisbogen mit vorgegebenem Radius tangential verbunden werden können. Diese Variante ermöglicht eine gewisse Dimensionierung der Verbindungsstraße bestimmt durch den vorgegebenen Radius. Nachteil ist allerdings, dass durch die Kombination Gerade-Kreisbogen-Gerade Krümmungssprünge vorliegen. Auch an den Schnittstellen zwischen der

Geraden und der ursprünglichen Geometrien können trotz Winkelübereinstimmung Krümmungssprünge vorliegen. Der vereinfachte Straßenverlauf mit Krümmungssprüngen wird unter der Annahme gerechtfertigt, dass in Knotenpunkten geringere Fahrgeschwindigkeiten vorliegen. Der Einfluss von Krümmungssprüngen auf das Lenkverhalten steigt mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit an, sodass durch die geringeren Geschwindigkeiten beim Abbiegen keine überdurchschnittlichen Fahrfähigkeiten des Fahrers vorausgesetzt werden.

In Bild (e) der Abbildung ist die Spurführung für eine T-Kreuzung unabhängig von der Erstellungsvariante dargestellt. Verbunden werden in diesem Beispiel alle möglichen Links-, Rechtsabbieger und Geradeausspuren. Zur Vervollständigung der Kreuzung werden den Verbindungslien Straßenbreiten und -markierungen zugeordnet.

Werden die Verbindungsstraßen durch einzelne Straßen nicht automatisiert erstellt, so ist auch die Definition zum Straßenlayout manuell durchzuführen. Durch Anwenden der anderen beiden Verfahren erfolgt auch die Definition des Straßenlayouts automatisiert. Dafür ist lediglich eine Information zum Typ der Kreuzung notwendig, da dieser unter anderem die Kreuzungsmarkierungen vorgibt. So unterscheiden sich Markierungen für Kreuzungen, die aus einer Neben- und einer Hauptstraße oder aus zwei Hauptstraßen bestehen. In Bild (f) ist das Straßenlayout für eine Kreuzung bestehend aus Haupt- und Nebenstraße dargestellt.

#### 4.3.4 Definition und Positionierung von Objekten

Zur Vervollständigung des gesamten Straßenlayouts und somit auch der letzte Arbeitsschritt zur vollständigen Beschreibung eines Straßennetzes werden Objekte definiert und in den einzelnen Segmenten platziert. Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit alle Verkehrsrelevanten Objekte, die in Kap. 3.2 herausgearbeitet und in der Straßenverkehrsordnung erläutert werden zu platzieren. Zur besseren Übersicht und zur vereinfachten Erstellung wird eine Gliederung herausgearbeitet, die in Abb. 4-23 dargestellt ist. Die erste Gruppe der Objekte stellen die Signale. Diese umfassen alle Objekte, die eine signalisierenden Einfluss auf den Fahrer haben. Zum einen werden darunter alle möglichen Straßenmarkierungen verstanden. Dabei geht es neben den Längsmarkierungen, die schon bei Erstellung der Straße Anwendung finden, hauptsächlich um Quermarkierungen oder Sinnbilder auf Straßen, die über eine Zeichensummer nach der Straßenverkehrsordnung definiert sind. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit individuelle Markierungen zu erzeugen, die in Länge, Breit und Farbe variierbar sind. Zu den Signalen zählen auch die Objekte, die zur Sicherheit des Fahrers beitragen. Dazu gehören Straßenbeleuchtungen, Leitplanken oder Leitpfosten, die auch über Zeichensummern oder genormte Größen vorgegeben sind. Als quasi-Stationäre Objekt gehören zu der Gruppe der Signale auch die Elemente um auf eine Baustelle hinzuweisen und den Verkehr dementsprechend umzuleiten. Auch hier erfolgt die Erstellung komfortabel über die Zeichensummer. Die letzte Untergruppierung der Signale befasst sich mit den Objekten, die die Straßenverkehrsregeln vorgeben. Darunter fallen alle Verkehrsschilder und Lichtsignalanlagen, die über eine Zeichensummer definiert sind. Dadurch werden Vorfahrtsregeln, Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie weitere Verkehrshinweise vorgegeben. Die Objekte werden hier allerdings nicht nur symbolisch hinzugefügt, sondern die enthaltenen Informationen werden den Straßen automatisch zugewiesen. So wird durch die Positionierung eines vorfahrtsregelnden Schildes, wie beispielsweise Vorfahrtgewähren die

entsprechende Priorisierung der Straßen abgeleitet. Auch das Einsetzen von geschwindigkeitsbegrenzender Beschilderung überschreibt somit die durch den Straßentyp vorgegebene Geschwindigkeitsgrenze für diesen Streckenabschnitt. Aus den vorliegenden Signalen werden somit die gleichen logischen Interpretationen vorgenommen, die ein Fahrer nach Wahrnehmung der Signale auch unternimmt. Wird eine Kreuzung ohne Beschilderung oder Lichtsignalanlage versehen, so ist daraus zu schließen, dass die Rechts-vor-Links-Regelung gilt.

Eine Option zur Vereinfachung der Erstellung von verkehrsregelnden Signalen wird durch die Vorgabe eines Kreuzungstypen erreicht. So können lediglich durch die Typdefinition die Beschilderung/Lichtsignalanlagen und die Priorisierungen der Straßen erstellt werden. Dabei sollte die exakte Positionierung der Elemente keine hohe Relevanz besitzen, da diese nach ermittelten Durchschnittswerten platziert werden.

Neben der Gruppe von Signalen gibt es noch weiter verkehrsrelevante Objekte. Dazu zählen Bushaltestellen, Verkehrsinseln und Parkplätze. Diese drei Objektgruppen lassen sich identisch nach den in Kap. 3.2 ermittelten Unterpunkten gliedern und sind Abb. 4-23 dargestellt.

Lässt sich das zu erstellende Objekt keinem der zuvor beschriebenen Gruppen zuordnen, so kann ein beliebiger Körper erstellt werden. Dafür wird die Lage einzelner Punkte definiert und angegeben ob jeweils zwei Punkte mit einer Geraden oder einem Kreisbogen verbunden werden sollen. Der entstehenden Fläche können dann Höhen sowie Farben zugewiesen werden.



Abb. 4-23: Gliederung der Objekte

Die Positionierung erfolgt für alle Objekte nach dem gleichen Prinzip und findet für jedes Segment individuell statt. Dabei wird zunächst unterschieden, ob das Objekt absolut oder relativ zu einem anderen Objekt positioniert werden soll. Die absolute Positionierung bezieht sich auf den Ursprung des mitbewegten Koordinatensystems der jeweiligen Straße. In Bezug zu diesem Punkt kann die Position durch einen Versatz in die jeweilige Koordinatenrichtung und durch einen Versatzwinkel um die Koordinatenachsen bestimmt werden. Des Weiteren wird einem Objekt eine Orientierungsrichtung zugewiesen, die durch einen Winkel um die Z-Achse angegeben wird.

Die relative Positionierung erfolgt entweder zu anderen Objekten oder zu besonderen Punkten. Geeignete Punkte sind Start- und Endpunkte von Straßen oder Schnittpunkte der Referenzlinien, da diese über eine Identifikationsbezeichnung aufgerufen werden können. Die Positionierung und die Orientierung erfolgt durch die gleichen Angaben wie bei der absoluten Positionierung, jedoch unterscheiden sich diese durch ihren Ausgangspunkt. Durch die relative Positionierung lassen sich beispielsweise Lichtsignalanlagen ausgehend vom Kreuzungsmittelpunkt positionieren, oder die an Autobahnen alle 50m auftretenden Leitpfosten zueinander referenzieren. Sich gleichmäßig wiederholende Objekte lassen sich vereinfacht durch die Abstandskoordinaten, die Richtung und die Anzahl der zu erstellenden Objekte definieren.

## 5 Umsetzung und Anwendung des Konzeptes

Nach einer vollständigen Erläuterung des Konzeptes im vorherigen Kapitel wird nun auf dessen Umsetzung und Anwendung eingegangen. Zunächst wird die Funktion zum Schließen eines Straßennetzes implementiert und anhand einiger Beispiele bewertet. Anschließend wird ein Eingabeformat und die zugehörige Struktur definiert. Abschließend folgt eine Anwendung des entwickelten Tools, welche ein vorgegebenes EingabefORMAT einliest und daraus OpenDRIVE-Dateien generiert.

### 5.1 Die Funktion CloseRoadNetwork

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Funktion aus Kap.4.1.2.1 als closeRoadNetwork bezeichnet. Für eine Implementierung der Funktion werden die Koordinaten und die Winkelstellungen der zu verbindenden Streckenarme als Eingabedaten festgelegt. Es folgt eine Beschreibung zur Umsetzung der Funktion sowie die Bewertung des Verfahrens zur Ermittlung von Hilfspunkten.

#### 5.1.1 Implementierung der Funktion

Die in Kap. 4.1.2.1 ermittelten Vorgehensweisen zur Bestimmung des Streckenverlaufs wird nun in MATLAB umgesetzt und anschließend beispielhaft ausgeführt. Nach Ermittlung der zu verbindenden Punkte und dem zugehörigen Kurventyp werden die Bestimmungsgrößen der Geometrien ermittelt. Eine Gerade ist durch die Angabe von Start und Endpunkt eindeutig bestimmt und es müssen keine weiteren Umrechnungen durchgeführt werden. Zur vollständigen Bestimmung der Verbundkurve reichen die Koordinaten von Start- und Endpunkt und dessen tangentiale Orientierungen nicht aus. Um die Verbundkurve trotzdem konstruieren zu können, wird eine Optimierungsfunktion entwickelt. Diese besteht aus einer Kostenfunktion, die die folgenden Parameter optimiert: Die Längen der beiden Spiralen und Länge und Radius des Kreisbogens. Ausgehend von vorgegebenen Startwerten für die Parameter werde diese dahingehend optimiert, dass das Ende der konstruierten Verbundkurve bis auf eine vorgegebene Genauigkeit den eigentlichen Endpunkt trifft. Der Variation der Parameter durch den Optimierer sind Grenzen gesetzt, da gewisse Randbedingungen, sowie Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Parametern vorgegeben sind. Zum einen dürfen keine Krümmungssprünge vorliegen, sodass die Krümmung im Start- und Endpunkt den Werten der angrenzenden Geometrien entspricht. Des Weiteren müssen die Spiralen an den Schnittstellen zum Kreisbogen die gleiche Krümmung wie der Kreisbogen besitzen. Auch das Verhältnis zwischen Radius und Klothoidenparameter ist durch die Grenzwerte aus Gl. 2-23 und Gl. 2-24 einzuhalten. Grundsätzlich besteht die Funktion closeRoadNetwork aus folgenden Arbeitsschritten:

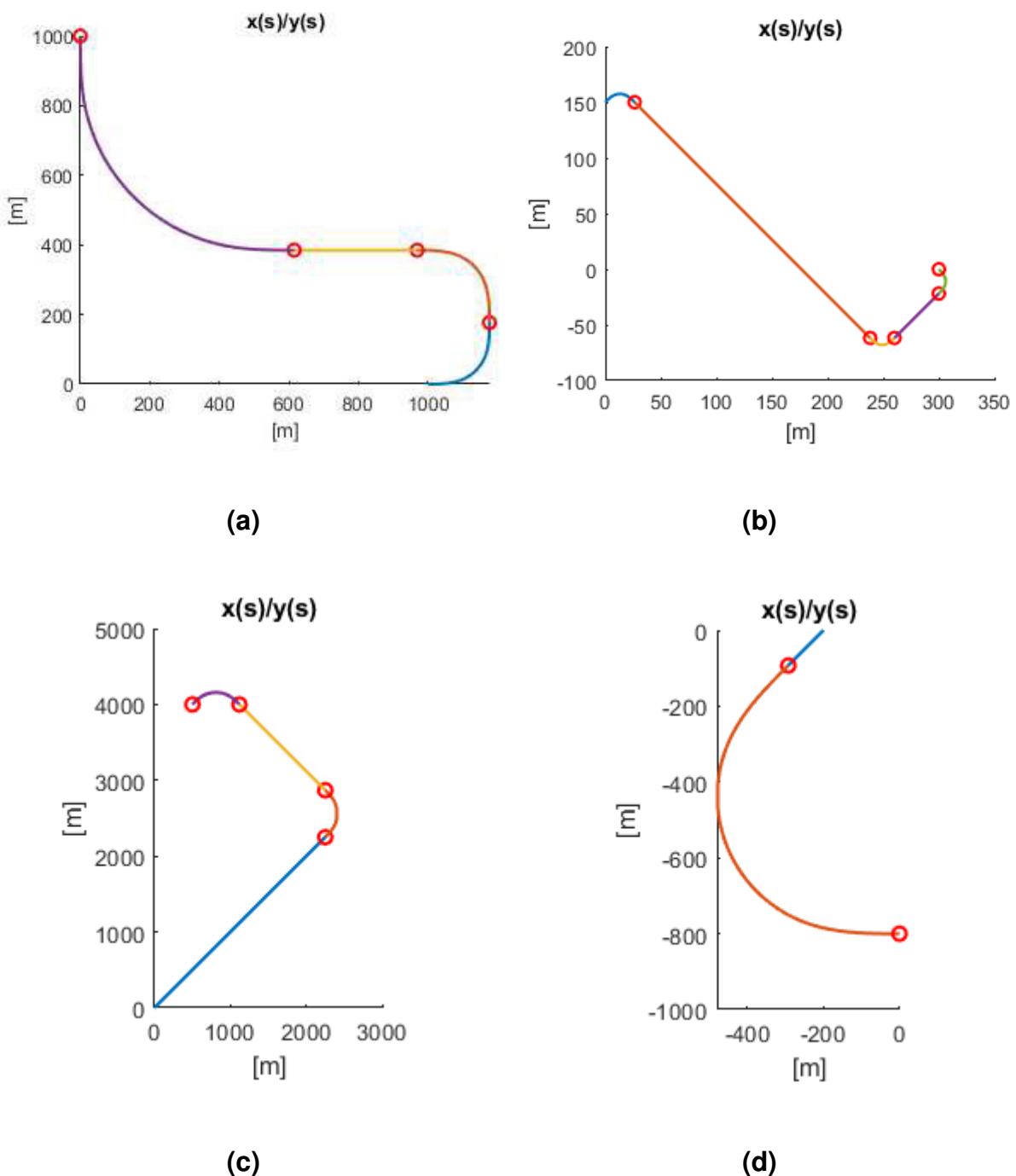
- Zunächst wird der Schnittpunkt bestimmt und kategorisiert
- Durch die Art des Schnittpunktes sowie weiterer Analysemethoden, die in Kap. 4.1.2.1 vorgestellt werden, kann die Notwendigkeit und die Lage eines Hilfspunktes bestimmt

werden. Weiterhin wird der Kurventyp sowie die tangentiale Orientierung in einem Hilfspunkt definiert.

- Anschließend werden die Bestimmungsgrößen der Kurventypen bestimmt
- Ist nach vollständiger Konstruktion des Kurventyps der Endpunkt nicht auf eine definierte Genauigkeit erreicht und das Straßennetz geschlossen, so werden die einzelnen Arbeitsschritte wieder von vorne durchlaufen, bis die vorgegebene Genauigkeit erreicht ist.

### 5.1.2 Ergebnisse und Bewertung der Funktion closeRoadNetwork

Die im Kapitel zuvor implementierten Arbeitsschritte werden genutzt um die Funktion für einige Beispiele zu testen. Dargestellt werden die in MATLAB generierten Plots, wobei der geometrische Verlauf, sowie das Krümmungsband wie in Kap. 2.2.2 beschrieben dargestellt werden. In den Beispielen werden die Koordinaten von Start- und Endpunkt, sowie die tangentiale Orientierung in den Punkten beliebig variiert. Im Graphen des geometrischen Verlaufs stellen die roten Ringe die Lage der ermittelten Hilfspunkte dar. Der letzte rote Ring steht für den Endpunkt und die erste blaue Geometrie startet immer im Startpunkt. Die weiteren Farben der einzelnen Geometrien dienen lediglich der besseren Darstellung. Die Verbindung zwischen zwei roten Ringen wird somit immer entweder durch eine Verbundkurve oder eine Gerade realisiert. Dargestellt werden in den Abb. 5-1 die verschiedene Straßenverläufe und in Abb. 5-2 die zugehörigen Krümmungsbänder (Bild (a) aus Abb. 5-1 gehört zu Bild (a) aus Abb. 5-2 usw.).



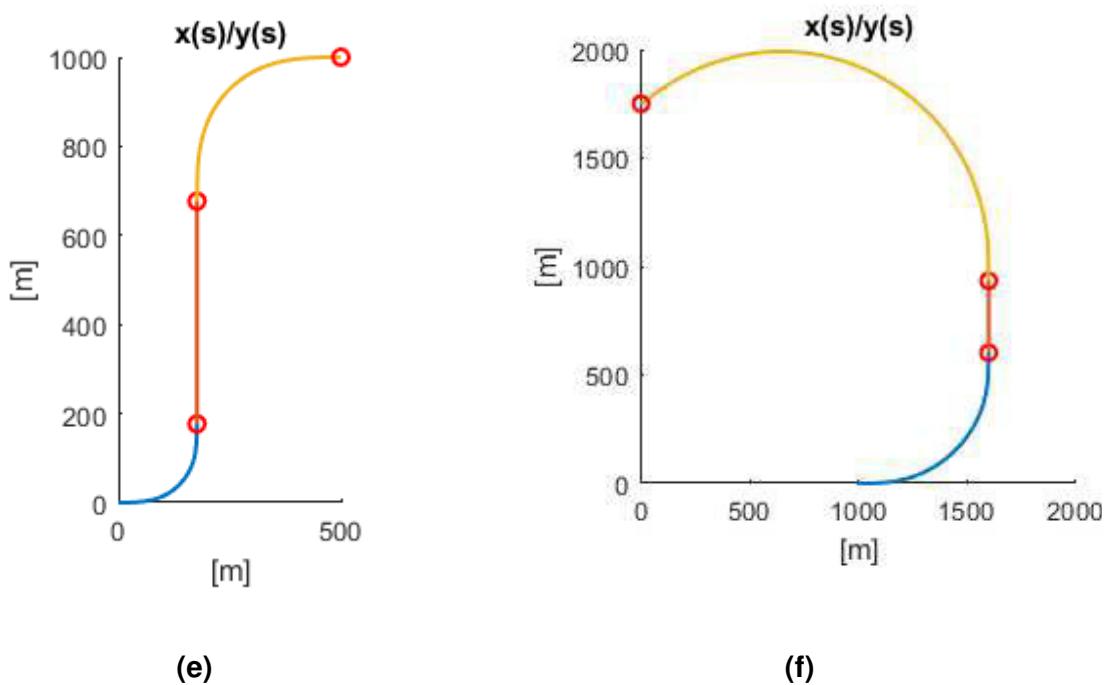
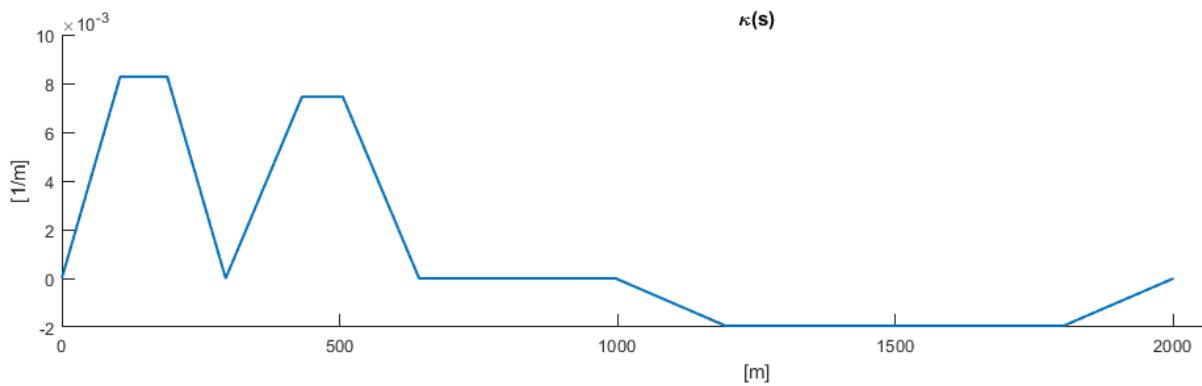


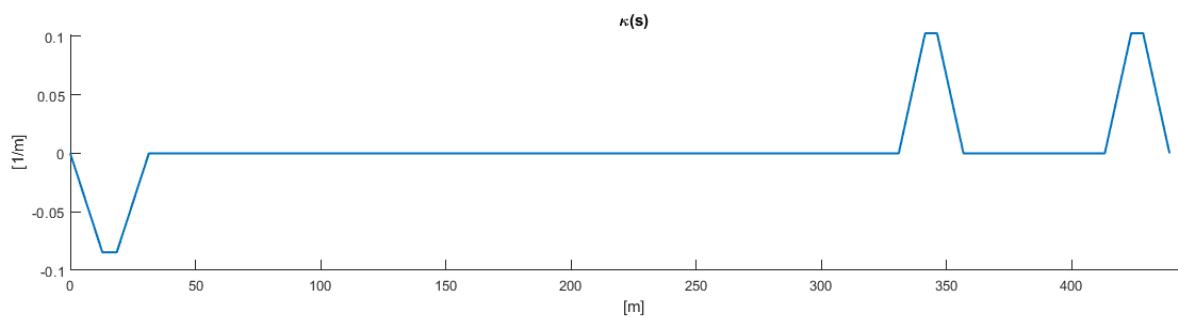
Abb. 5-1: Geometrische Verläufe

Die Bewertung der Funktion erfolgt über die Analyse der Graphen. In erster Linie bedeutet eine fehlerfreie Ausführung der Funktion und das erfolgreiche plotten der Graphen, dass der Endpunkt hinreichend genau getroffen wird. Als nächstes wird das Krümmungsband auf Sprünge in dessen Verlauf untersucht, da diese vermieden werden sollen und bei Vorhandensein eine fehlerhafte Straßenkonstruktion bedeuten. Als letztes kann der geometrische Verlauf auf korrekte Darstellung überprüft werden. Zunächst der rein optische Vergleich der Eingangsdaten und dem realisierten Straßenverlauf und danach eine konservative Abschätzung, ob der erstellte Straßenverlauf einer annähernd direkten Verbindungsstraße entspricht.

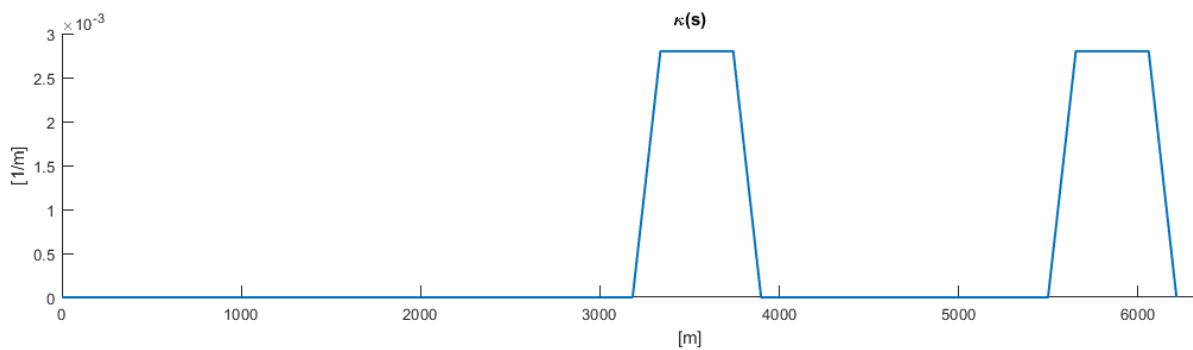
Die erfolgreich erstellten Streckenverläufe in den Abb. 5-1 beinhalten eine fehlerfreie Ausführung der Funktion. Die Betrachtung der Krümmungsbänder aus Abb. 5-2 liefert für alle Strecken sprungfreie Verläufe. Der Streckenverlauf entspricht in allen Fällen den geforderten Eingangsdaten. Zu sehen ist, dass abhängig von den jeweiligen Eingangsdaten, automatisiert unterschiedlich viele Hilfspunkte, sowie unterschiedlich viele Geometrien genutzt werden. Auch die Dimensionen und die Krümmungsrichtungen der Geometrien werden auf richtige Weise ermittelt. Die geforderte Voraussetzung zur Verbindung aller beliebiger Straßenenden ist somit vollständig erfüllt.



(a)



(b)



(c)

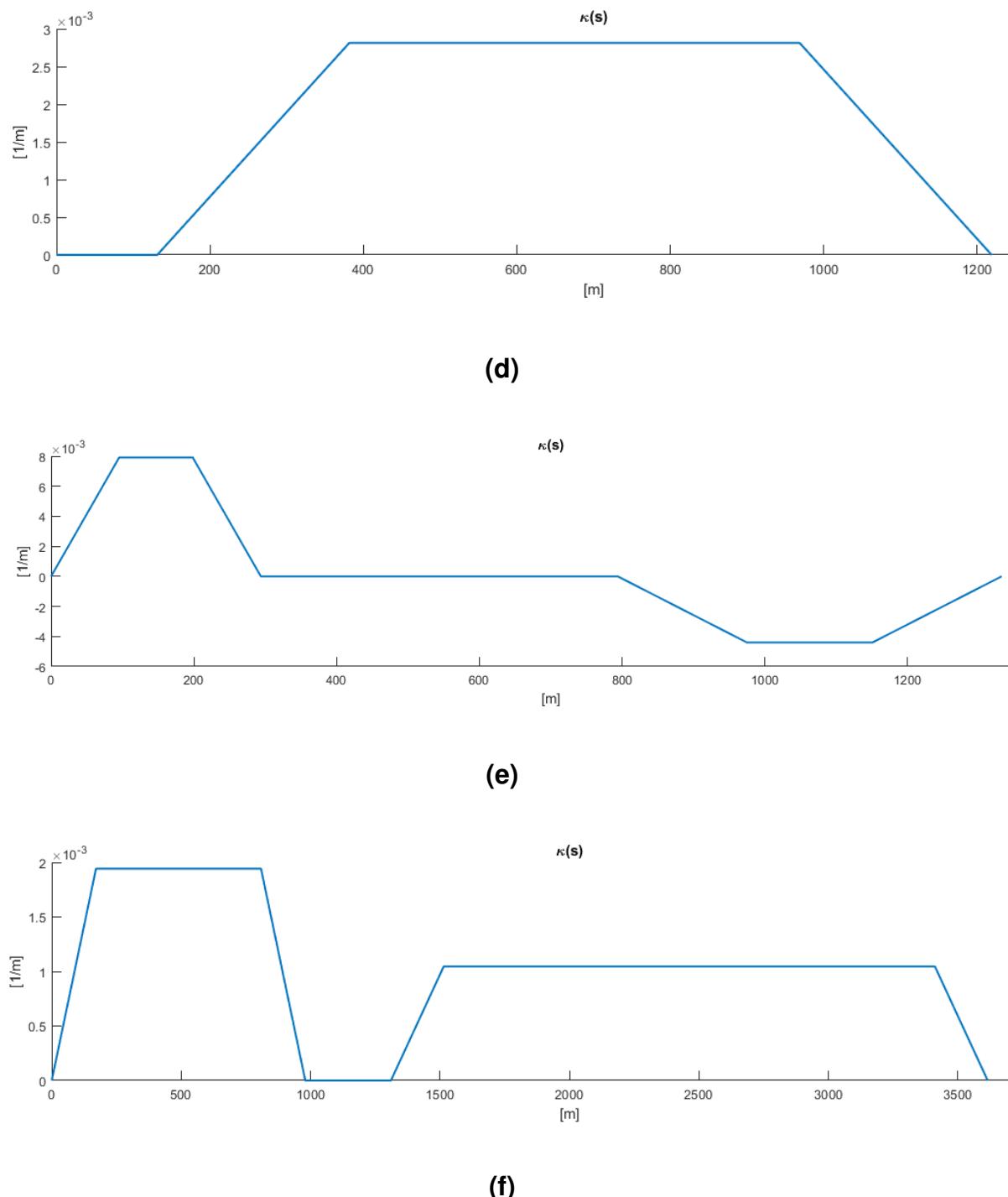


Abb. 5-2: Krümmungsbänder

Die Kostenfunktion benötigt zunächst Startwerte für die Parameter, damit von einem Ausgangspunkt aus optimiert werden kann. Diese Startwerte werden nach der folgenden Überlegung empirisch ermittelt. Aufgrund des beschriebenen Vorgehens zur Ermittlung der Hilfspunkte aus Kap. 4.1.2.1 ermöglicht die Lage der Punkte im Falle der Anwendung einer

Verbundkurve diese immer symmetrisch auszuführen. Somit ist für die Startwerte des Optimierers ausreichend, wenn die Dimensionen und die Proportionen der Bogenlängen ungefähr zueinander passen. Zur Bestimmung der Verhältnisse werden für einige symmetrische Verbundkurven die einzelnen Bogenlängen ermittelt. Durchschnittlich hat sich ergeben, dass die Spirallängen ca. 20% und die Kreisbogenlänge ca. 60% des Abstandes zwischen Start- und Endpunkt besitzen. Ausgehend von diesen Startwerten werden alle hier vorliegenden Streckenverläufe erstellt. Auch weitere Versuche habe auf Basis dieser Startwerte die Streckenverläufe problemlos erstellen können. Eine weitere Optimierung würde eventuell die Rechenzeit der Funktion etwas mindern, allerdings keinen ausschlaggebenden Einfluss auf den ermittelten Kurvenverlauf besitzen.

Bei der Ermittlung der Hilfspunkte aus Kap. 4.1.2.1 wird die Lage häufig über 25% eines Abstandes definiert. Dies ist eine Abschätzung zur sicheren Seite, da die zu erstellenden Strecke im Extremfall ein Winkel von  $360^\circ$  überwunden muss. Sollten der Winkel größer als  $360^\circ$  sein, so lässt sich durch Änderung der Krümmungsrichtung der zurückzulegende Winkel reduzieren. Ein Beispiel für solch einen Fall bei dem ein Winkel von  $360^\circ$  überbrückt werden muss ist in Abb. 5-3 dargestellt. In diesem Beispiel sind in schwarz die zu verbindenden Streckenarme dargestellt und in bunt die Verbundkurven zur Erstellung des Streckenverlaufs. Dabei kann der Streckenverlauf in jeden Fall durch vier symmetrische Verbundkurven realisiert werden, wobei der Öffnungswinkel der Verbundkurven jeweils  $90^\circ$  beträgt. Damit dies möglich ist, müssen die relativen Koordinaten der Hilfspunkte vom jeweiligen Startpunkt aus kleiner gleich einem Viertel der charakteristischen Strecke sein, damit vier Verbundkurven unter Einhaltung der Grenzen für die Klothoidenparameter zwischen Start- und Endpunkt untergebracht werden können. Die Festlegung dieses konstanten Faktors von 25% stellt sicher, dass alle Straßenenden verbunden werden können. Diese Überlegung führt allerdings nicht zu Ermittlung des kürzesten Streckenverlaufs, da dadurch der Streckenverlauf aus Bild (b) der Abbildung zustande kommt, wobei Bild (a) den kürzesten Weg aufzeigt. Die Ermittlung des kürzesten Streckenverlaufs benötigt zusätzliche Fallunterscheidungen, damit die weiteren Hilfspunkte in Abhängigkeit des noch zu überwindenden Winkels gesetzt werden. Denn für das vorliegende Beispiel aus Bild (b) könnte die erste Verbundkurve für ein Viertel der charakteristischen Strecke aufgestellt werden, die zweite für ein Drittel der neuen charakteristischen Länge, da nur noch drei Verbundkurven benötigt werden. Analog kann dann die dritte Verbundkurve für die Hälfte der charakteristischen Länge ermittelt werden. Insgesamt wird jede Verbundkurve für ein Viertel der ursprünglichen charakteristischen Strecke aufgestellt. Diese Überlegungen und Fallunterscheidungen sind allerdings Fallspezifisch und müssen individuell ermittelt werden. Die Funktionsentwicklung ist abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall und somit der Notwendigkeit der Erstellung der kürzesten Strecke.

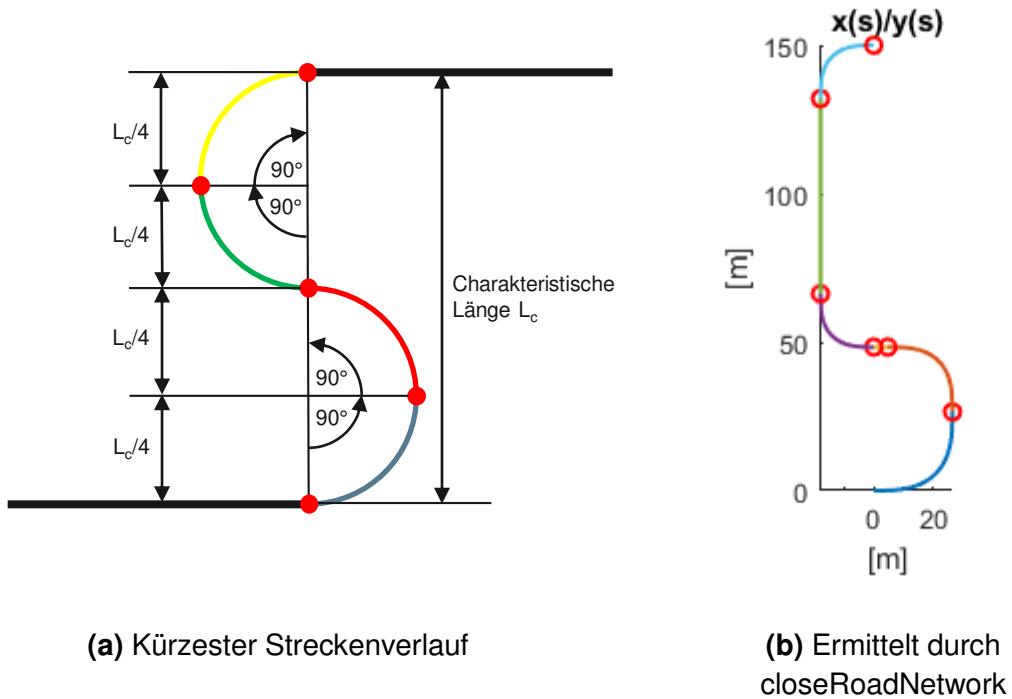


Abb. 5-3: Ermittelter geometrischer Verlauf durch CloseRoadNetwork und theoretisch kürzester Streckenverlauf

Der Optimierer bestimmt die Parameter der Verbundkurve soweit bis eine gewisse Genauigkeit zum Endpunkt erreicht wird. Dabei wird allerdings nicht beachtet, ob durch eine weitere Parameterkombination die Genauigkeit erreicht wird, allerdings die Länge der Verbundkurve geringer ist. Somit wird durch die bisherige Kostenfunktion ein lokales Minimum berechnet und nicht unbedingt das Absolute. Zu sehen ist dies beispielsweise in Abb. 5-1 Bild (d). Der bestimmte Straßenverlauf entspricht schon auf den ersten Blick nicht der kürzesten Strecke. Die rote Verbundkurve besitzt einen zu großen Radius und es kann hier von der Bestimmung eines lokalen Minimums ausgegangen werden. Durch ersetzen der roten Verbundkurve durch zwei kleine Verbundkurven und eine Gerade lässt sich die Streckenlänge verkürzen. Auch bei dieser Problematik ist zu prüfen inwiefern für den Anwendungsfall die kürzeste Strecke gewünscht ist oder eine korrekte Verbindung im Fokus steht.

Im Laufe der Umsetzung und der Generierung der Straßenverläufe haben sich gewisse Veränderungen bzw. Weiterentwicklungen des Konzeptes ergeben. Dies bezieht sich vor allem auf die Definition von gewissen Schwellbereichen. Diese können zum einen genutzt werden um die Hilfspunkte und Geometrien zu bestimmen oder um die Schnittpunktart anwendungsbezogen zu verändern.

Durch die Aufweitung der klaren Grenzen und somit der Wahl des Kurventyps und der Hilfspunkte, lässt sich die Anzahl der verwendeten Trassierungselemente verringern. In Abb. 4-6 wird anhand des Vergleiches der beiden Längen zum Schnittpunkt bestimmt, ob eine Verlängerung durch eine Gerade benötigt wird. Durch Einhaltung der klaren Grenzen und der

eindeutigen Unterscheidung der Längen besteht im Extremfall die Möglichkeit, dass überflüssigerweise eine sehr kleine Gerade eingefügt wird. Um dies zu vermeiden wird ein Schwellbereich eingeführt, der mit einem Zuschlag von 10% in beide Richtungen definiert wird. So müssen die Strecken nicht mehr identisch sein, sondern die eine Strecke muss im Bereich von 90% bis 110% der anderen Strecke liegen, damit keine Verlängerungsgerade benötigt wird. Dadurch wird die Anzahl der Trassierungselemente verringert, wobei zu beachten ist, dass dementsprechend auch unsymmetrische Verbundkurven eingesetzt werden.

Des Weiteren können die Schwellbereiche genutzt werden, um die Schnittpunktart aufgrund ihrer Lage und Ausprägung zu verändern. Zur besseren Verständlichkeit werden zwei Geraden angenommen, die einen sehr kleinen Schnittwinkel besitzen und somit einen gemeinsamen Schnittpunkt haben. Abhängig vom Winkel und dem Abstand der zu betrachteten Punkte kann es für gewisse Anwendungsfälle einfacher sein die Straßenenden als parallele Geraden ohne Schnittpunkt zu betrachten. Im Rahmen dieser Arbeit werden allerdings keine Veränderungen der Schnittpunktart vorgenommen, da für die Umsetzung keine Testfälle genutzt werden, für die es vorteilhaft ist.

## 5.2 Dateninput und Dateiformat zur Anwendung des Tools

In Kap. 3.3 wird die Forschungsfrage ermittelt und konkretisiert, dabei ergeben sich gewisse Anforderungen an die Schnittstelle zwischen dem Anwender und den Inputdaten. Zum einen werden die erforderlichen Angaben, also die zu parametrisierenden Variablen und zum anderen das EingabefORMAT ermittelt.

Die erforderlichen Inputdaten zur Erstellung eines Straßennetzes sind durch das vorgestellte Konzept gewissermaßen vorbestimmt. Dabei wird bei der Entwicklung des Konzeptes darauf geachtet, dass die Eingabeparameter intuitiv und logisch anzugeben sind. So werden zur Erstellung der Geometrien lediglich Längen und Radien benötigt. Die weiteren Angaben beziehen sich auf logische Referenzpunkte, sodass keine Hilfsmittel oder Umrechnungen zur Angabe erforderlich sind.

Des Weiteren wird neben den Parametern auch die Eingabeform bzw. das Dateiformat entwickelt. Dabei stehen die Anforderungen der Automatisierbarkeit und benutzerfreundlichen Angabe im Fokus. Der Dateninput wird durch eine XML-Datei realisiert, wobei dafür eine eigene Syntax entwickelt wird. Diese ist analog zum Aufbau des Konzeptes strukturiert und liefert aufgrund üblicher und intuitiver Bezeichnungen eine hohe Übersicht.

Eine genaue Beschreibung zu den einzelnen Tags, dem Aufbau und den Parametern ist im Anhang in Kap. 11.5 zu finden. Zusätzlich werden zu den Tags auch die einzelnen Attribute mit ihren Wertebereichen und Einheiten genauer erläutert. Dieses Handbuch stellt die Grundlage zur Erstellung aller Inputdateien und gilt als Nachschlagewerk. Im Folgenden werden nun die Struktur und der Aufbau des Eingabeformates anhand von Abb. 5-4 erläutert. Dabei werden der modulare Aufbau und die einzelnen Grundelemente ersichtlich, wobei hier nur auf die wesentlichen Ebenen der hierarchischen Struktur eingegangen wird. Der vollständige Aufbau mit den weiteren Ebenen, die zur vollständigen Parametrisierung benötigt werden, ist dem Handbuch zu entnehmen.

Die erste Ebene zur Beschreibung eines Straßennetzes besteht aus der Summe aller einzelnen Segmente, dessen Zusammenbau durch relative Anordnung zueinander, sowie der

Funktion closeRoadNetwork zum Schließen des Straßennetzes. Die Funktion closeRoadNetwork, sowie die Anordnung der Segmente wird durch die Angabe der Segmentnummern und der jeweiligen Verbindungspunkte bestimmt. Für eine übersichtliche Erstellung der Segmente werden hier weitere Differenzierungen vorgenommen. Abgeleitet aus den in Kap. 3.2 ermittelten Segmente eines Straßennetzes, lassen sich die Segmente auch hier in Kreuzungen, Kreisverkehre und Verbindungsstraßen unterteilen. Weiterhin lassen sich Kreuzungen in Bezug auf die Anzahl der Kreuzungssarme gliedern. Somit sind in der Abbildung die Untergruppen der T-, X- und N-Kreuzungen dargestellt. Eine genauere Betrachtung einer T-Kreuzung liefert vier wesentliche Grundbausteine. Dies sind zum einen Straßen, die über die Definition eines Kreuzungsmittelpunktes relativ zueinander angeordnet werden. Des Weiteren ermöglicht die Angabe eines Kreuzungsbereiches die Erstellung der exakten Spurführung einer Kreuzung und durch die Positionierung verschiedener Objekte lässt sich das Kreuzungsbild vervollständigen. In der untersten Ebene sind einzelne Untergruppen zur Bestimmung des Straßenverlaufes zu finden. Dafür wird zunächst eine Referenzlinie aus einzelnen Geometrien zusammengesetzt. Anschließend erhält diese ein Höhenverlauf, sodass eine Kurve im Raum vorliegt. Dieser Kurve werden dann Fahrspuren und ein zugehöriges Querprofil zugewiesen.

Die anderen Segmente bestehen aus der Zusammensetzung gewisser Grundbausteine. In der Abbildung in Rot eingeraumt und durch den Buchstaben „B“ gekennzeichnet wird zur besseren Übersicht eine Straße mit den dazugehörigen Objekten zusammengefasst. Dieser Grundbaustein ist nach derselben Struktur der Hauptbestandteil einer Verbindungsstraße. Das blaue Rechteck, gekennzeichnet durch den Buchstaben „A“, fasst die notwendigen Elemente einer T-Kreuzung zusammen. Eine Zerlegung der anderen Segmente führt zu der Betrachtungsweise, dass eine X-Kreuzung aus zwei zusammengesetzten T-Kreuzungen besteht. Genau so ist ein Kreisverkehr als Zusammenschluss mehrerer T-Kreuzungen zu interpretieren.

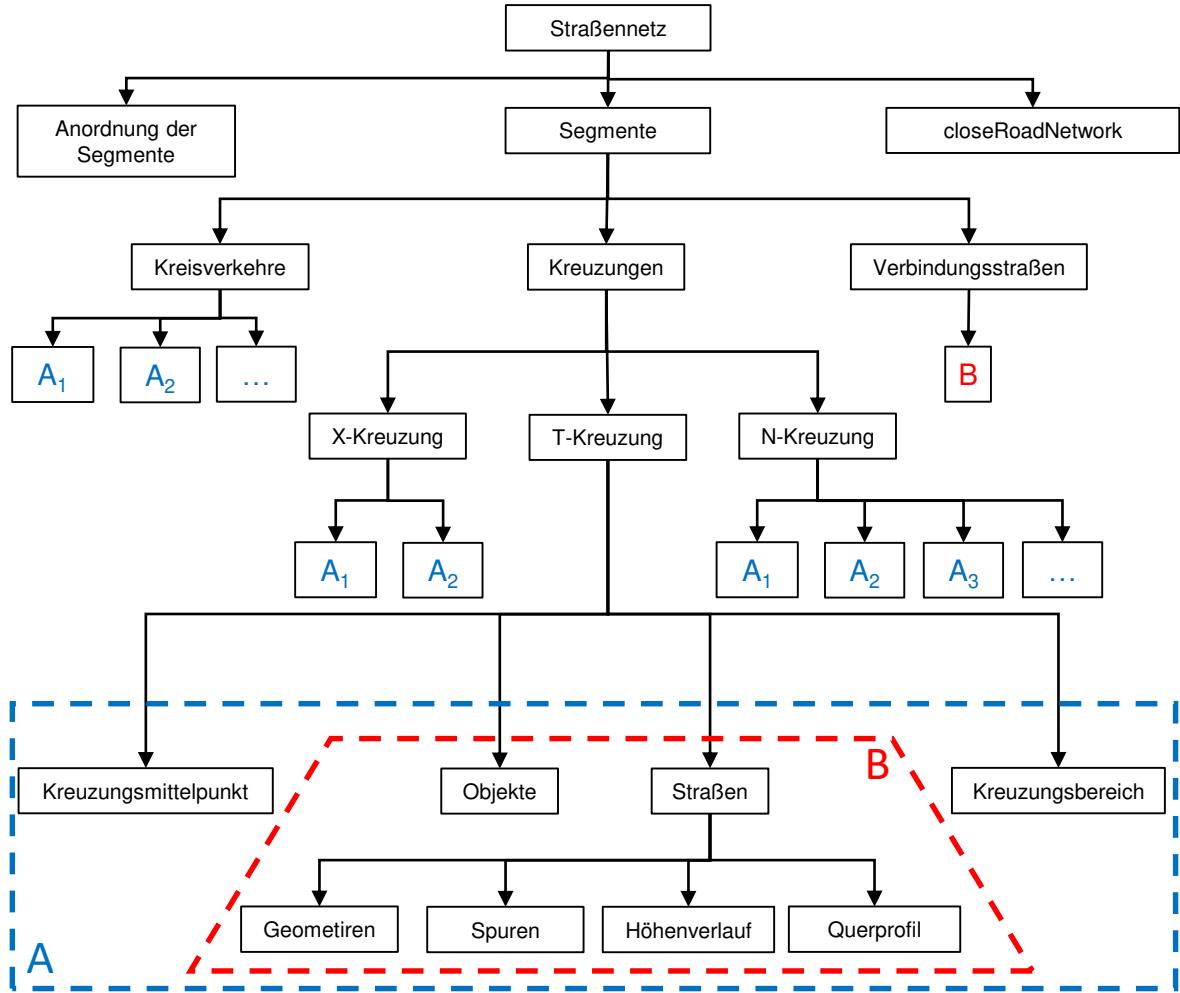


Abb. 5-4: Hierarchischen Struktur und Aufbau des Eingabeformates

### 5.3 Anwendung und Bewertung des Konzeptes

In diesem Kapitel wird die Implementierung des Tools zur Erstellung logischer und variierbarer virtueller Strecken beschrieben. Dabei wird anhand von einigen Beispielen schrittweise die Umsetzung erläutert und mithilfe von generierten OpenDRIVE-Dateien die Funktionsfähigkeit des Tools bewertet.

#### 5.3.1 Umsetzung des Konzeptes am Beispiel einer T-Kreuzung

Ausgehend von der im vorherigen Kapitel erläuterten Inputschnittstelle, werden verschiedene Beispieldateien erzeugt. In diesem Kapitel wird nun ein Tool entwickelt, welches diese Dateien in OpenDRIVE-Dateien übersetzt. Die Schnittstelle zwischen den beiden Dateiformaten wird hier in C++ implementiert.

Das Eingabeformat bietet die Möglichkeit verschiedene Strecken zu definieren. Dafür werden die in Kap. 11.5 erläuterte Struktur und die zugehörigen Parameter verwendet. Die Parameter sind eindeutig definiert und besitzen vorgegebene Wertebereiche. Das Eingabeformat mit

definierter Syntax stellt somit die logische Streckenbeschreibung dar. Der Anwender kann durch das Erstellen von Inputdateien konkrete Strecken definieren. Dafür werden den einzelnen Parametern Werte zugewiesen, sodass der geltende Wertebereich der logischen Beschreibung konkretisiert wird. Durch Verändern der Parameter innerhalb der Wertebereiche können verschiedene Inputdateien zur konkreten Streckenbeschreibung erzeugt werden. Die im folgenden erstellten Inputdateien entsprechen alle konkreten Streckenbeschreibungen aus derselben logischen Beschreibung, die in Kap. 11.5 definiert ist. Wird ein Parameter in der Inputdatei nicht konkretisiert, so vergibt das Tool automatisiert den statistisch wahrscheinlichsten Wert. Die konkreten Streckenbeschreibungen werden anschließend von dem entwickelten Tool in OpenDRIVE-Dateien überführt.

Das Tool besteht im Grunde aus drei Hauptbestandteilen: Reader, Umrechner und Printer. Der Reader liest die Inputdatei ein und speichert dessen Inhalt ab. Dafür wird die Datei zeilenweise „durchgelesen“ und der Inhalt der einzelnen Tags und den zugehörigen Attributen abgespeichert.

Der Umrechner besteht zunächst aus den notwendigen Klassen, Methoden und den zugehörigen Parametern, die zur Erstellung der OpenDRIVE-Syntax benötigt werden. Des Weiteren werden Funktionen entwickelt, die beispielsweise die mathematischen Hauptpunktberechnungen aus Kap. 2.2.1 besitzen um die Parameter der Inputdatei in den OpenDRIVE-Standard umzurechnen. In Abhängigkeit der vom Reader gespeicherten Daten werden die zugehörigen Instanzen der Klassen erzeugt und durch die entsprechenden Umrechnungen parametrisiert. Grundsätzlich sind die Parameter der einzelnen Klassen jeweils mit ermittelten Durchschnittswerten deklariert. Wird in der Inputdatei ein anderer Wert für einen Parameter angegeben, so wird dieser überschrieben.

Nachdem alle Informationen eingelesen und umgerechnet sind, ist es die Aufgabe des Printers diese Informationen in einer korrekten OpenDRIVE-Syntax in eine XML-Datei zu schreiben. Am Beispiel einer beliebigen T-Kreuzung wird auf besondere Herausforderungen und die einzelnen Arbeitsschritte eingegangen, die sich bei der Umsetzung ergeben. Die erstellte Inputdatei besteht aus zwei Straßen, der eindeutigen Definition eines Kreuzungsmittelpunktes und des Kreuzungsbereiches.

1. Im ersten Schritt werden alle Informationen vom Reader eingelesen und abgespeichert
2. Werden einzelne Geometrien aneinandergesetzt, so ist die Hauptpunktberechnung der geometrischen Elemente nötig. Die ermittelten Koordinaten und Orientierungen werden dem nächsten Element als Startwerte zugewiesen.
3. Anschließend werden die Informationen zur Angabe des Kreuzungsmittelpunktes (KMP) und die zugehörige Lage der Straßen zueinander verarbeitet. Dementsprechend wird eine der Straßen in den Kreuzungspunkt verschoben und gedreht. Anschließend werden die neuen Startkoordinaten der Straße berechnet und abgespeichert. Nach dem bisherigen Arbeitszustand entspricht das Segment Abb. 5-5 Bild (a).

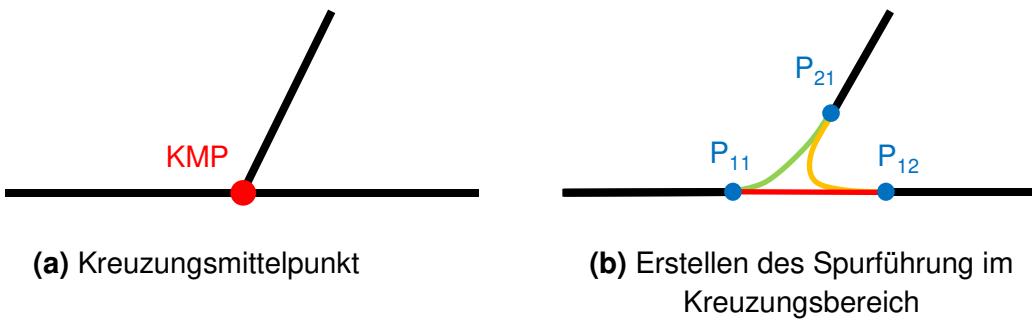


Abb. 5-5: Darstellung des Kreuzungsmittelpunktes eines Segmentes und der Spurführung im Kreuzungsbereich

4. Nun gilt es den Kreuzungsbereich genau zu modellieren. In diesem Beispiel wird der Fall betrachtet, bei dem der Kreuzungsbereich symmetrisch ausgeführt ist und alle möglichen Fahrrouten dargestellt werden sollen. Die Generierung der Verbindungsstraßen erfolgt hier automatisiert. Dazu werden zunächst die drei charakteristischen Punkte  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  und  $P_{21}$  aus Abb. 5-5 Bild b und die dazugehörigen tangentialen Orientierungen bestimmt. Die Punkte ergeben sich durch das Antragen des Kreuzungsbereiches, wie in Kap. 4.3.3 erläutert und dessen Schnittpunkte mit den Referenzlinien.
  5. Im nächsten Schritt wird nun zunächst der Kreuzungsbereich geleert, d.h., dass die Referenzlinien an den Punkten aufgetrennt und die Streckenabschnitte zwischen den Punkten gelöscht werden. Somit ergeben sich aus den ursprünglichen zwei Straßen die drei schwarzen Straßenteile aus Bild b.
  6. Darauffolgend wird der Kreuzungsbereich mit Verbindungsstraßen für eine vollständigen Spurführung befüllt. Dafür werden die drei berechneten Punkte jeweils miteinander verbunden. Für jede Verbindungsstraße wird eine neue eigenständige Straße erstellt. Die möglichen Geometrien zur Ermittlung der Verbindungsstraßen beschränken sich für diesen Testfall auf Geraden und Kreisbögen. Ein Krümmungssprung wird in diesem Testfall akzeptiert, da wie bereits zuvor erläutert der Einfluss auf das Lenkverhalten bei geringen Geschwindigkeiten vernachlässigbar ist. Abhängig von der Winkelstellung der zu verbindenden Streckenarme kann nun die Geometrie gewählt werden. Bei einem Differenzwinkel ungleich Null wird ein Kreisbogen und bei keinem Differenzwinkel eine Gerade verwendet. Aufgrund des symmetrischen Kreuzungsbereiches besteht in diesem Fall eine Verbindungsstraße nur aus einer Geometrie. Die Bestimmungsgrößen und die Positionierung der Geometrien ergeben sich aus den Punktkoordinaten und den tangentialen Orientierungen in diesen Punkten. An den Schnittstellen zur Verknüpfung zweier Geometrien gelten die bereits bekannten Bedingungen der geometrischen und tangentialen Übereinstimmung (in diesem expliziten Testfall wird die Übereinstimmung der Krümmung vernachlässigt). Dadurch ergeben sich für das schematische Beispiel

aus Abb. 5-5 die rote Grade und der grüne und gelbe Kreisbogen. Abhängig vom Typ der Kreuzung, sowie von der Lage der Verbindungsstraße und der angrenzenden Straßen werden die Fahrspuren und die Markierungen angepasst.

7. Aus den in der Inputdatei ursprünglich angegebenen zwei Straßen werden durch die Erstellung des Kreuzungsbereiches durch das Tool insgesamt sechs Straßen konstruiert. Diese werden abschließend mit allen erforderlichen Informationen in der OpenDRIVE-Syntax in eine XML-Datei geschrieben.

Diese Arbeitspunkte zeigen das Vorgehen zur Erstellung eines Segmentes auf. In Abb. 5-4 sticht die wiederholte Verwendung gewisser Grundbausteine hervor. Somit führt auch die wiederholte Anwendung dieser Arbeitsschritte zur Erstellung weiterer Segmente.

### 5.3.2 Darstellung und Bewertung der generierten OpenDRIVE-Dateien

Zur Überprüfung der implementierten Schnittstelle werden für einige Testfälle Inputdateien erstellt und mithilfe des entwickelten Softwaretools in OpenDRIVE-Dateien konvertiert und bewertet. Für erstellte Straßenverläufe gibt es allerdings keine Bewertungsverfahren bzw. Gütestufen. Nach normgerechter Konstruktion und Beachtung der Richtlinien zur Erstellung sind diesbezüglich keine anschließenden Maßnahmen zur Bewertung üblich. Eine Straße entspricht somit entweder der Konstruktionszeichnung oder nicht. Um jedoch zu überprüfen ob die implementierte Schnittstelle die Inputdaten auf korrekte Weise in valide OpenDRIVE-Dateien umrechnet werden folgende Überprüfungsmaßnahmen für die virtuellen Strecken vorgenommen:

1. Eine Überprüfung der Winkel- und Krümmungsverläufe, besonders an den Übergängen zweier Geometrien, liefert Informationen über die korrekte Kopplung der Straßen. Da die Kopplungsbedingungen allerdings notwendige Bedingungen bei der Erstellung der Straßen sind und somit vorgegeben werden, erfolgt dadurch keine Bewertung der erstellten Strecke, sondern lediglich eine Bestätigung der korrekten Ausführung der implementierten Funktionen.
2. Des Weiteren kann die generierte OpenDRIVE-Datei auf Einhaltung der spezifischen Syntax überprüft werden.
3. Eine erste optische Bewertung erfolgt mit Hilfe des OpenDRIVE Viewers der VIRES Simulationstechnologie GmbH. Dieses Tool ermöglicht die zweidimensionale Darstellung von OpenDRIVE-Dateien.

Zunächst bestätigt ein fehlerfreies einlesen der generierten Datei die korrekte Syntax und die Vollständigkeit für eine Visualisierung. Nach erfolgreicher Verarbeitung wird der Streckenverlauf auf korrekte Darstellung überprüft. Eine erste oberflächliche Bewertung wird dadurch realisiert, dass verglichen wird, ob der dargestellte Streckenverlauf überhaupt dem geforderten Input entspricht. In einer genaueren Betrachtung der Strecken wird darauf geachtet, ob die Strecken fehlerfrei und ohne

Lücken oder lateralem Versatz dargestellt werden.

4. Eine weitere visuelle Überprüfung kann durch 3D-Visualisierungstools, wie beispielsweise Unity 3D oder Virtual Test Drive realisiert werden. Dadurch lässt sich die korrekte Darstellung und Positionierung der dreidimensionalen Objekte bewerten.
5. Die letzte Methode zur Überprüfung der generierten virtuellen Straße ergibt sich durch dessen Integration in eine Simulation. Dafür wird ein Szenario auf der erstellten Strecke abgespielt und auf das Verhalten der Fahrzeuge geachtet. Unter Voraussetzung korrekter Fahrer- und Fahrzeugmodelle kann ein unerwartetes Verhalten der Fahrzeuge möglicherweise auf Fehler der Strecke deuten.

Nach Festlegung der Bewertungsmethoden wird nun zunächst ein beliebiger Straßenverlauf erstellt um das Konzept zu testen. Dargestellt ist dieser Straßenverlauf durch den OpenDRIVE Viewer in Abb. 5-6:

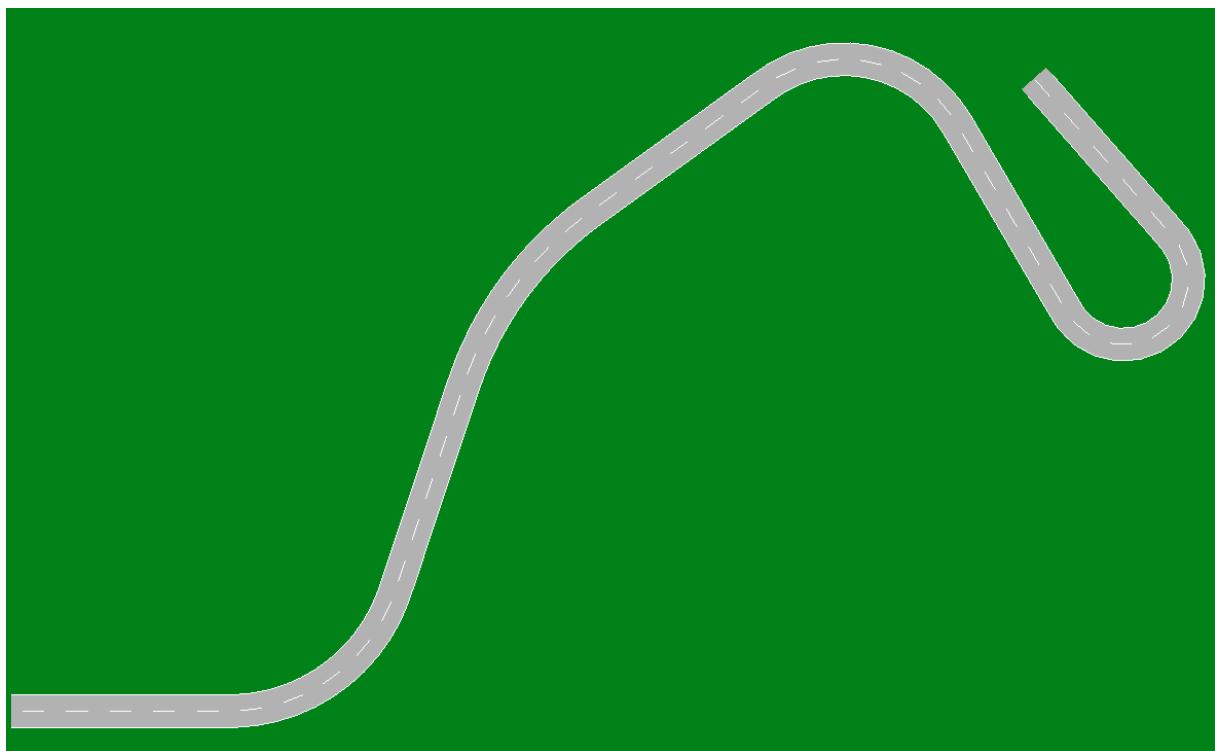


Abb. 5-6: Darstellung eines Straßenverlaufs in OpenDRIVE Viewer

Weiterhin wird das Konzept am Beispiel einiger T-Kreuzungen getestet. Dabei bestehen diese aus geraden Straßenmündungen. Der Kreuzungsbereich ist symmetrisch ausgeführt, sodass die Verbindungsstraßen aus Kreisbögen und Geraden erstellt werden. Die durch den OpenDRIVE Viewer erstellten T-Kreuzungen sind in Abb. 5-7, Abb. 5-8 und Abb. 5-9 dargestellt.

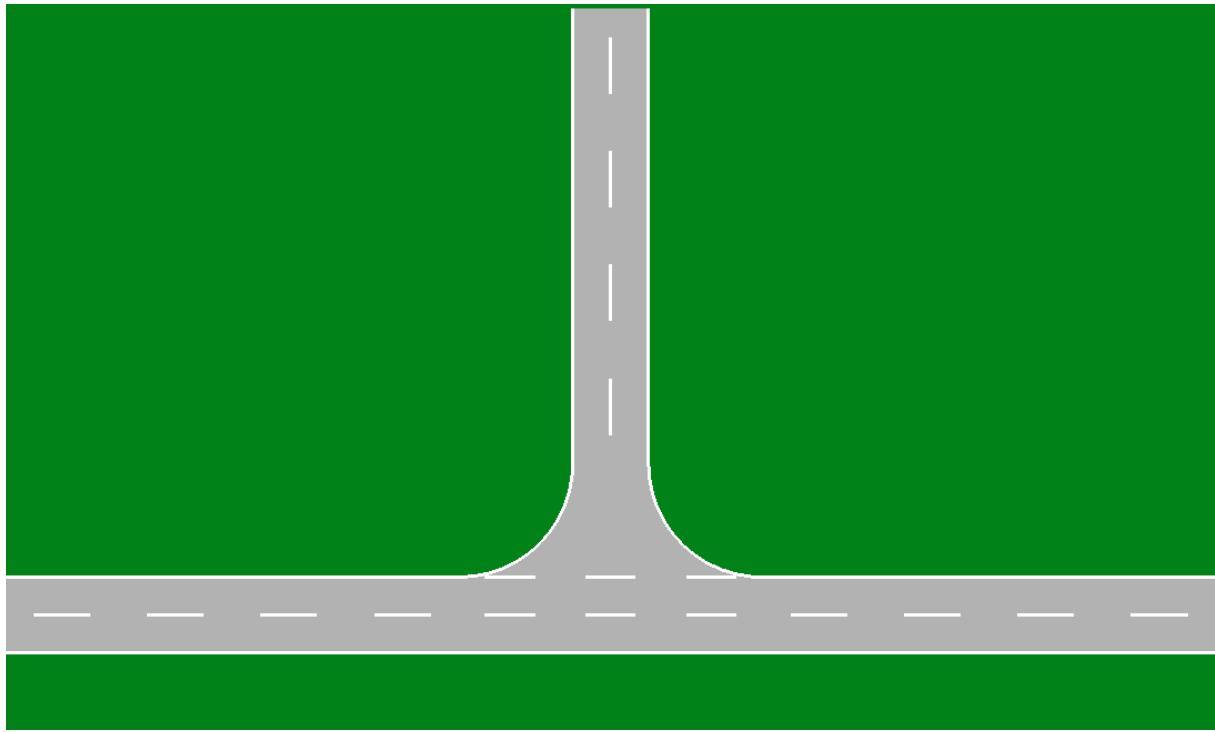


Abb. 5-7: Darstellung einer T-Kreuzung mit einem Schnittwinkel von  $90^\circ$  in OpenDRIVE Viewer

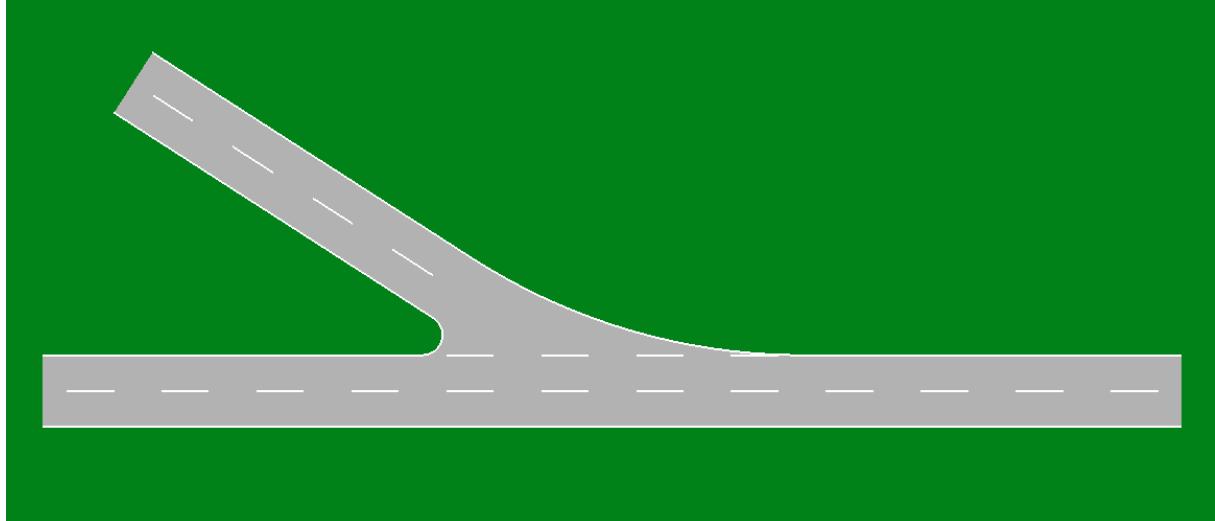


Abb. 5-8: Darstellung einer T-Kreuzung mit einem Schnittwinkel von  $145^\circ$  in OpenDRIVE Viewer

Im Rahmen der Arbeit findet eine Bewertung nach den ersten drei Methoden statt. Der Winkelverlauf der Straßen ist in diesen Fällen nur an den Übergängen zweier Geometrien von Relevanz. Dafür werden die in den generierten OpenDRIVE-Dateien ermittelten Koordinaten und tangentialen Orientierungen durch manuelle Berechnungen überprüft. Da die Visualisierung der Bilder fehlerfrei ausgeführt wird, lässt sich auf eine korrekte Syntax der

generierten OpenDRIVE-Dateien schließen. Die für die vorliegenden Testfälle generierten OpenDRIVE-Dateien sind allerdings auf die notwendigen Inhalte für eine vollständige Darstellung beschränkt. Die oberflächliche optische Analyse fällt auch positiv aus, da der gewünscht Input korrekterweise einer Straße bzw. einer T-Kreuzung entspricht. Des Weiteren ist bei genauer Betrachtung eine fehlerfreie Darstellung in allen Fällen vorhanden und es sind keine Lücken oder Ungenauigkeiten vorhanden.

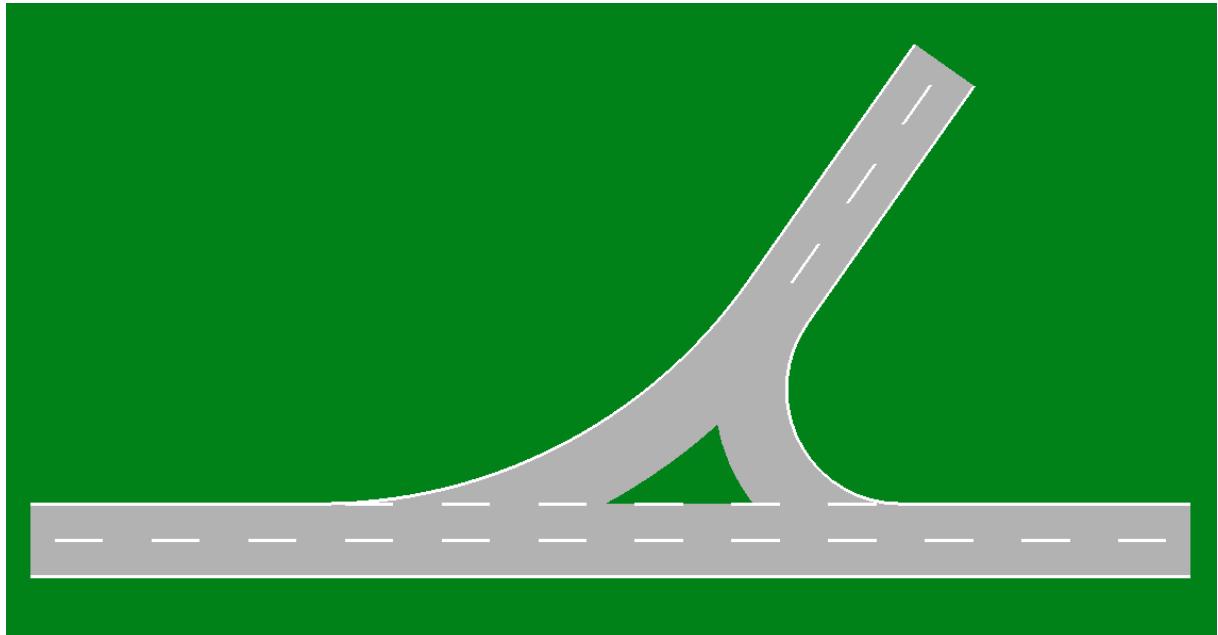


Abb. 5-9: Darstellung einer T-Kreuzung mit einem Schnittwinkel von  $55^\circ$  und sehr großen Kreuzungsbereich in OpenDRIVE Viewer

Unvollständigkeiten liegen in der automatisierten Erstellung der Straßenmarkierungen vor. In Abb. 5-9 ist der Kreuzungsbereich so groß gewählt worden, dass beispielsweise ein Fahrbahnteiler und entsprechende Markierungen angebracht werden sollten. Diese Problematik lässt sich durch weitere Abfragen in der Implementierung lösen, da durch die Berechnungen der Spurbreiten die theoretisch vorliegenden Freiräume ermittelt werden können.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird der Inhalt der Arbeit zunächst zusammengefasst. Auf Basis der erarbeiteten Erkenntnisse und der generierten Ergebnisse findet eine Bewertung statt. Aufbauend auf der Bewertung werden die potentiellen des Konzeptes herausgearbeitet und der weitere Entwicklungsmöglichkeiten hervorgehoben.

### 6.1 Zusammenfassung und Diskussion der Arbeit

Im Rahmen der Arbeit wird ein Tool entwickelt, das die Erstellung logischer und varierbarer Straßen ermöglicht. Ziel ist die erfolgreiche Übersetzung und Umrechnung der Eingabedaten in die OpenDRIVE-Syntax.

Dabei wird zunächst auf die Grundlagen und den Stand der Technik eingegangen. Im ersten Schritt wird auf die Notwendigkeit der virtuellen Verkehrssimulation zur Absicherung von automatisierten Fahrunktionen eingegangen und dessen Detailierungsgrade sowie Teilmodelle erläutert. Die Arbeit befasst sich mit dem Umweltmodell der nanoskopischen Simulation.

Im nächsten Kapitel werden die Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Hauptpunkte für Geraden, Kreisbögen und Spiralen hergeleitet. Weiterhin werden die Beziehungen und Darstellungsweisen des geometrischen Verlaufs, dem Winkelverlauf und dem Krümmungsband erläutert.

Anschließend wird der Entwicklungsprozess einer realen Straßenkonstruktion betrachtet. Als grundlegende Elemente zur Erstellung einer Trassierung gelten die Gerade, der Kreisbogen und die Klothoide. In Deutschland besteht jede nach den entsprechenden Richtlinien konstruierte Straße aus diesen drei sogenannten Trassierungsgrundelementen. Die Erstellung einer Referenzlinie erfolgt in der Ebene und wird anschließend durch Zuweisung eines Höhenverlaufs im Raum definiert. Durch die Definition von Querprofilen und Querneigungen wird der Erstellungsprozess abgeschlossen.

Eine Erläuterung zu den Abstraktionsebenen von Szenarien zeigt hier den Unterschied zwischen funktionalen, logischen und konkreten Strecken auf. Die Arbeit befasst sich mit einem Tool zur logischen Streckenbeschreibung, dass durch Parametrisierung einen konkreten Streckenverlauf beschreibt. Abschließend wird im Kapitel der Grundlagen das Dateiformat OpenDRIVE erläutert. Dieses XML-Format besitzt eine vorgegebene Syntax und dient zur Beschreibung eines Straßennetzes. Die Darstellung durch OpenDRIVE hat sich mittlerweile in der Branche etabliert und wird deshalb als Output des zu entwickelnden Tools gewählt. Aufgrund der redundanten und nicht intuitiven Syntax ist es die Aufgabe des Tools die Informationen des Anwenders in valide OpenDRIVE-Dateien zu konvertieren.

Unter Betrachtung aktueller Systeme zur Erstellung virtueller Straßen wird der Forschungsbedarf ermittelt. Diesbezüglich zeigt sich Entwicklungsbedarf bei der Automatisierbarkeit, der Realitätsnähe der virtuellen Straßenverläufe und bei der Struktur der Eingabedaten. Eine Analyse des Campus Boulevards in Aachen dient zur Konkretisierung der Entwicklungsaufgabe und der Erstellung eines Forschungsansatzes. Dabei werden die wesentlichen Segmente eines Straßennetzes ermittelt und in ihre Einzelteile zerlegt. Daraus

ergibt sich der Ansatz eines modularen Aufbaus mit relativer Referenzierung und der Ermittlung maßgebender Parameter.

Im vierten Kapitel wird das erarbeitete Konzept zur Erstellung der virtuellen Straßen detailliert erläutert. Ein Straßennetz besteht dabei aus der Summe der einzelnen unabhängigen Segmente. Diese bestehen aus mehreren Straßen, die wiederum aus den Trassierungsgrundelementen bestehe. Die Anordnung und Spurführung der Straßen erfolgt hier über die Definition eines Kreuzungspunktes sowie einem Kreuzungsbereich. Durch die Definition eines Höhenprofils sowie dem Straßenlayout wird das Straßenbild vervollständigt. Zusätzlich wird eine Funktion entwickelt, die zwei beliebige Straßenenden vorschriftsgemäß verbindet. Dadurch kann ein Straßennetzwerk mit geringem Aufwand geschlossen werden und die Gefahr der Überbestimmtheit oder der einer Lücke im Straßenverlauf vermieden werde.

Abschließend wird das Konzept exemplarisch umgesetzt und auf Funktionalität geprüft. Im ersten Schritt wird die Funktion zum Schließen eines Straßennetzwerkes in MATLAB implementiert. Sowohl der geometrische Verlauf als auch das Krümmungsband werden zur Bewertung herangezogen. Die Umsetzung zeigt auf, dass mit dem vorliegenden Konzept alle Straßenenden sinnvoll und ohne Krümmungssprünge verbunden werden können.

Als nächstes wird ein EingabefORMAT definiert. Auf Basis einer entwickelten Struktur zum Aufbau der Eingabedaten wird eine XML-Syntax formuliert. Die verwendeten Tags entsprechen üblichen und intuitiven Begriffen und die zugehörigen Attribute können von charakteristischen Referenzpunkten aus angegeben werden.

Zur Überprüfung des gesamten Konzeptes wird ein Tool in C++ programmiert, dass die erstellten Inputdateien in OpenDRIVE-Dateien übersetzt. Die Testfälle umfassen beliebige Straßenverläufe sowie T-Kreuzungen. Dargestellt werden die erzeugten Straßennetze durch den OpenDRIVE Viewer. Insgesamt betrachtet wird durch die exemplarische Umsetzung die Funktion des Konzeptes für die vorliegenden Testfälle nachgewiesen und liefert somit das Potential zur vollständigen Implementierung des Tools zur Erstellung logischer und variierbarer Strecken.

## 6.2 Ausblick

Zur weiteren Überprüfung des Konzeptes bzw. zur Vollständigen Implementierung gilt es zunächst die Anwendungsbereiche sowie die zugehörigen Detailierungsgrade des Tools etwas genauer zu definieren.

Abhängig von dieser Definition kann die Funktion closeRoadNetwork weiterentwickelt werden. Dafür können dem Optimierer weiterer Bedingungen zugeordnet werden, sodass immer das absolute Minimum der Kostenfunktion ermittelt wird. Das bedeutet, dass die Parameterkombination ermittelt wird, bei der die Verbundkurve zwischen zwei Punkten die geringste Gesamtlänge besitzt. Des Weiteren kann die Positionierung der Hilfspunkte dahingehend verbessert werden, dass diese zusätzlich in Abhängigkeit des noch zu überwindenden Winkels positioniert werden und so die kürzeste Gesamtstrecke ermittelt wird. Dies bedeutet beispielsweise, dass in Abb. 5-3 nicht der Verlauf aus Bild (b) sondern der aus Bild (a) realisiert wird.

Der aktuelle Stand der Funktion setzt voraus, dass die zu verbindenden Streckenarme an den Schnittstellen keine Krümmung besitzen. Für eine flexible Anwendung der Funktion ist eine Weiterentwicklung für beliebige Krümmungszustände anzustreben.

Für die entwickelte Syntax der Inputdatei gilt es für die Definition einiger Objekte gewisse Gestaltungsgrößen zu ermitteln, damit diese über intuitive Angaben definiert werden können. Dies bezieht sich hier auf das Handbuch im Anhang und umfasst lediglich die Attribute der markierten Tags.

Um die Schnittstelle zum Anwender benutzerfreundlicher zu gestalten kann dafür eine graphische Benutzerschnittstelle (GUI) entwickelt werden. Dabei kann der Anwender durch eine anschauliche Darstellung und direkte schematische Visualisierung der Eingangsdaten den Input besser nachverfolgen. Zusätzlich kann die Eingabe vereinfacht werden, indem den Parameter Beziehungen und Abhängigkeiten zueinander vergeben werden. Dadurch wird der Wertebereich der Parameter kontinuierlich an die Eingabedaten angepasst. Die durch die GUI dargestellten Eingaben könnten sich nach der Struktur aus Kap. 5.2 gliedern, sodass aus den Eingaben der GUI eine hier entwickelte Inputdatei generiert wird, die wiederum von dem Tool in das OpenDRIVE-Format übersetzt wird. Dabei ist zu beachten, dass die GUI lediglich der Benutzerschnittstelle dient und nicht der automatisierten Generierung eines Straßennetzes beiträgt.

Um das Tool zu vervollständigen gilt es zunächst die Erstellung der anderen Segmente zu ermöglichen. Im nächsten Schritt ist das Zusammensetzen der einzelnen Segmente zu einem Straßennetzwerk zu realisieren. Des Weiteren ist die Darstellung und Positionierung der Objekte zu implementieren. Abschließend sollte die in MATLAB vollständig entwickelte Funktion closeRoadNetwork in C++ übersetzt werden damit auch dessen Inhalt durch das Tool in eine valide OpenDRIVE-Datei geschrieben werden kann.

Um die Variabilität des Konzeptes zu prüfen müssen zunächst einige Segmente erstellt werden. Anschließend kann durch beliebige Anordnung dieser Segmente zueinander eine große Anzahl an Straßennetzen erzeugt werden. Dadurch wird der Grad der Automatisierung erhöht und die Erstellung zufälliger Straßennetzwerke ermöglicht.

## 7 Formelzeichen und Indizes

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
$A$	$m^2$	Klothoidenparameter
$H$	$m$	Halbdurchmesser einer kreisförmigen Ausrundung
$L$	$m$	Länge
$L_c$	$m$	Charakteristische Länge
$L_g$	$m$	Länge der Geraden
$L_k$	$m$	Kreisbogenlänge
$R$	$m$	Radius
$R_e$	$m$	Radius der Klothoide im Endpunkt
$R_s$	$m$	Radius der Klothoide im Startpunkt
$S$	$m$	Sehnenlänge
$b$	$m$	Fahrbahnbreite
$d_{0E}$	$m$	Länge zwischen Null- und Endpunkt
$d_{0IP}$	$m$	Länge zwischen Null- und Schnittpunkt
$d_{EIP}$	$m$	Länge zwischen End- und Schnittpunkt
$h$	$m$	Höhe
$q$	%	Querneigung
$s$	$m$	Länge in s-Richtung
$s_v$	$m$	Verwindungslänge
$s_{Offset}$	$m$	Abstand in s-Richtung

t	$m$	Länge in t-Richtung
tOffset	$m$	Abstand in t-Richtung
x	$m$	Länge in x-Richtung
xOffset	$m$	Abstand in x-Richtung
$\Delta x$	$m$	Differenzstrecke in x-Richtung
y	$m$	Länge in y-Richtung
yOffset	$m$	Abstand in y-Richtung
$\Delta y$	$m$	Differenzstrecke in y-Richtung
z	$m$	Länge in z-Richtung
zOffset	$m$	Abstand in z-Richtung
$\Phi$	$^\circ$	Winkel
$\alpha$	$^\circ$	Winkel
$\alpha$ Offset	$^\circ$	Abstandswinkel
$\beta$	$^\circ$	Differenzwinkel / Relativwinkel
$\kappa$	$1/m$	Krümmung
$\sigma$	$^\circ$	Sehnen-Tangenten-Winkel
$\tau$	$^\circ$	Öffnungswinkel der Klothoide

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	6-Ebenen-Modell zur Beschreibung von Szenarien [ECK18] .....	7
Abb. 2-1:	Darstellung der Verkehrssimulation mit der Unterteilung in das Fahrer-, Fahrzeug- und Umweltmodell [EXT19, BLO19, UNI19, DEU16, BUS19, SPI08, PRE19, VIR19a] .....	11
Abb. 2-2:	Vorgehen zur Berechnung der Hauptpunkte einer Geraden .....	14
Abb. 2-3:	Vorgehen zur Berechnung der Hauptpunkte eines Kreisbogens .....	15
Abb. 2-4:	Darstellung einer Klothoide mit beiden Ästen [SPE17] .....	17
Abb. 2-5:	Vorgehen zur Berechnung der Hauptpunkte einer Klothoide .....	17
Abb. 2-6:	Geometrischer Verlauf, Winkelverlauf und Krümmungsband eines beispielhaften Streckenverlaufs bestehend aus Geraden, Kreisbögen und Klothoiden [BEC17] .....	21
Abb. 2-7:	Chronologische Darstellung der Arbeitsschritte zur Erstellung realer Straßen [PIE00, LÖT01] .....	22
Abb. 2-8:	Einzelschritte bis zum Linienentwurf am Beispiel einer Musterstadt [STR19] .....	23
Abb. 2-9:	Grundelemente der Trassierung .....	25
Abb. 2-10:	Übergangsbögen der Trassierung .....	26
Abb. 2-11:	Arbeitsschritte der Tangentenmethode .....	27
Abb. 2-12:	Arbeitsschritte der Grundkreismethode .....	28
Abb. 2-13:	Arbeitsschritte zur Erstellung eines Höhenplans .....	30
Abb. 2-14:	Schematische Darstellung der Ausrundungen eines Kreisbogens und einer Parabel .....	31
Abb. 2-15:	Querneigung und Verdrehung .....	32
Abb. 2-16:	Verwindung der Fahrbahnfläche bei einem Krümmungswechsel [RES19] .....	34
Abb. 2-17:	Abstraktionsebenen von Szenarien mit zugehörigen Beispielen [BAG17] .....	36
Abb. 2-18:	Grundstruktur von OpenDRIVE [DUP06] .....	37
Abb. 2-19:	Erstellungsstufen einer Straße in OpenDRIVE [DUP19] .....	38
Abb. 2-20:	Verlauf einer Referenzlinie in OpenDRIVE in Abhängigkeit von ihrer Position zu den Koordinatensystemen [DUP19] .....	39
Abb. 2-21:	Darstellung einer T-Kreuzung in OpenDRIVE .....	40
Abb. 3-1:	Einteilung eines Straßennetzes in Segmente am Beispiel des Campus-Boulevard .....	43
Abb. 3-2:	Auflistung aller Features für die Erstellung von Segmenten .....	44
Abb. 3-3:	Schrittweise Zerlegung der Segmente in Features .....	45
Abb. 3-4:	Einteilung eines Straßennetzes in Objekte am Beispiel des Campus-Boulevard .....	47
Abb. 4-1:	Arbeitsschritte zum Erstellen der Referenzlinie einer T-Kreuzung .....	51
Abb. 4-2:	Arbeitsschritte zum Erstellen der Referenzlinie eines Kreisverkehrs .....	52
Abb. 4-3:	Anordnen der Segmente in einem Straßennetzwerk .....	54

Abb. 4-4:	Schließen eines Straßennetzwerkes durch das letzte Segment.....	54
Abb. 4-5:	Darstellung aller Schnittpunktarten der Vektoren an den Straßenenden.....	57
Abb. 4-6:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „pn“ und der Fall, dass $dEI_p < d0I_p$ ist.....	59
Abb. 4-7:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „pn“ und der Fall, dass $d0I_p < dEI_p$ ist.....	60
Abb. 4-8:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „i“ und der Fall, dass $\beta = \pi$ ist.....	61
Abb. 4-9:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „i“ und der Fall, dass $\beta = 0$ ist und der zweite Schnittpunkt „0p“ lautet.....	62
Abb. 4-10:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „i“ und der Fall, dass $\beta = 0$ ist und der zweite Schnittpunkt „0n“ lautet.....	62
Abb. 4-11:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „p“ und der Fall, dass $\beta = 0$ ist.....	63
Abb. 4-12:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „p“ und der Fall, dass $\beta = \pi$ ist und der zweite Schnittpunkt „p0, pn, np, n0“ lautet .....	64
Abb. 4-13:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „p“ und der Fall, dass $\beta = \pi$ ist und der zweite Schnittpunkt „pp, nn“ lautet .....	65
Abb. 4-14:	Vorgehen zur Erstellung einer Straße zwischen den beiden Straßenenden für die Schnittpunktart „np“ .....	66
Abb. 4-15:	Beispielhafter Straßenverlauf zur Verbindung zweier Straßenenden unter Beachtung der Sperrfläche .....	67
Abb. 4-16:	Arbeitsschritte zur Erzeugung von linearen Querprofilen .....	69
Abb. 4-17:	Angaben zur Erzeugung eines quadratischen Querprofils .....	69
Abb. 4-18:	Angaben zur Erzeugung eines kubischen Querprofils .....	70
Abb. 4-19:	Notwendige Parameter zur Erstellung einer Spurerweiterung mit und ohne Sperrfläche .....	71
Abb. 4-20:	Darstellung einer Spurerweiterung in der Kurve .....	72
Abb. 4-21:	Drei verschiedene Varianten zur Bestimmung des Kreuzungsbereiches in Knotenpunkten am Beispiel einer T-Kreuzung .....	72
Abb. 4-22:	Arbeitsschritte zur Erstellung der Linienführung in Knotenpunkten am Beispiel einer T-Kreuzung .....	74
Abb. 4-23:	Gliederung der Objekte.....	78
Abb. 5-1:	Geometrische Verläufe .....	82
Abb. 5-2:	Krümmungsbänder .....	84

---

Abb. 5-3:	Ermittelter geometrischer Verlauf durch CloseRoadNetwork und theoretisch kürzester Streckenverlauf.....	86
Abb. 5-4:	Hierarchischen Struktur und Aufbau des Eingabeformates.....	89
Abb. 5-5:	Darstellung des Kreuzungsmittelpunktes eines Segmentes und der Spurführung im Kreuzungsbereich .....	91
Abb. 5-6:	Darstellung eines Straßenverlaufs in OpenDRIVE Viewer.....	93
Abb. 5-7:	Darstellung einer T-Kreuzung mit einem Schnittwinkel von 90° in OpenDRIVE Viewer.....	94
Abb. 5-8:	Darstellung einer T-Kreuzung mit einem Schnittwinkel von 145° in OpenDRIVE Viewer.....	94
Abb. 5-9:	Darstellung einer T-Kreuzung mit einem Schnittwinkel von 55° und sehr großen Kreuzungsbereich in OpenDRIVE Viewer.....	95
Abb. 11-1:	Vorgehen zur eindeutigen Bestimmung der Lage der Vektoren für die Schnittpunktart „pn“ .....	110
Abb. 11-2:	Vorgehen zur eindeutigen Bestimmung der Lage der Vektoren für die Schnittpunktart „i“ .....	111
Abb. 11-3:	Vorgehen zur eindeutigen Bestimmung der Lage der Vektoren für die Schnittpunktart „p“ .....	111
Abb. 11-4:	Einteilung eines Straßennetzes in Verkehrseinflüsse am Beispiel des Campus-Boulevard.....	112

## 9 Abkürzungsverzeichnis

<b><u>Kürzel</u></b>	<b><u>Bezeichnung</u></b>
ACC	Adaptive Cruise Control
EKA	Entwurfsklasse Autobahn
EKL	Entwurfsklasse Landstraße
GUI	Graphische Benutzeroberfläche (engl. Graphical user interface)
HP	Hauptpunkt
KMP	Kreuzungsmittelpunkt
MP	Mittelpunkt
OEM	Erstausrüster (engl. Original Equipment Manufacturer)
P	Punkt
RAA	Richtlinien für die Anlage von Autobahnen
RAL	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen
RAS <i>t</i>	Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen
RAS-L	Richtlinien für die Anlage von Straßen - Linienführung
RAS-Q	Richtlinien für die Anlage von Straßen - Querschnitt
RIN	Richtlinien für integrierte Netzgestaltung
XML	Extensible Markup Language

## 10 Literatur

- [BAG17] BAGSCHIK G., et al.  
Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten  
Fahrzeugen  
Pegasus, 2017
- [BAG18] BAGSCHIK G., et al.  
Detaillierung einer stichwortbasierten Szenariobeschreibung für die  
Durchführung in der Simulation am Beispiel von Szenarien auf  
deutschen Autobahnen  
Pegasus, 2018
- [BAI08] BAIER, Reinhold  
Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen  
RASt 06  
FGSV-Verl.  
Köln, Korr. Nachdr Auflage, 2008
- [BEC17] BECKER DANIEL  
Optimized Generation of Road Structures for Traffic Simulations  
Masterarbeit  
Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen  
Aachen, 2017
- [BIT10] TIMO FLORIAN BITZER  
Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs  
Promotion  
Universität Stuttgart, 2010
- [BLO19] BLOG.MERCEDES-BENZ-PASSION  
Mercedes-AMG Project One  
<https://blog.mercedes-benz-passion.com/2017/05/erster-blick-auf-die-antriebskomponenten-des-amg-hypercar-project-one/>, abgerufen am:  
01.04.2019
- [BRE04] BREUER, Karsten  
Verkehrsflusssimulation zur Entwicklung von  
Fahrerassistenzsystemen  
Forschungsges. Kraftfahrwesen  
Aachen, 2004  
(Schriftenreihe Automobiltechnik)
- [BUN19] BUNDESAMT, Statistisches  
Verkehrsunfälle - Fachserie 8 Reihe 7 - Februar 2019  
Statistisches Bundesamt, 2019
- [BUS19] BUSSGELDKATALOG  
Mindestabstand zur Ampel - Verkehrsrecht 2019  
<https://www.bussgeldkatalog.org/mindestabstand-ampel/>, abgerufen  
am: 02.04.2019

- [CHR07] Christenn F. (Hrsg.)  
PELOPS White Paper  
Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2007
- [CHR08] Christen F.; Huang Q. (Hrsg.)  
Das Fahrermodell im Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS  
Modellierung und Applikationsmöglichkeiten  
Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen, 2008
- [DEU16] DEUTSCHLANDFUNK  
Chinas Wirtschaft 2017 - Wirtschaften wie ein Vogel im Käfig  
[https://www.deutschlandfunk.de/chinas-wirtschaft-2017-wirtschaften-wie-ein-vogel-im-kafig.769.de.html?dram:article\\_id=375105](https://www.deutschlandfunk.de/chinas-wirtschaft-2017-wirtschaften-wie-ein-vogel-im-kafig.769.de.html?dram:article_id=375105),  
abgerufen am: 02.04.2019, 2016
- [DUP06] DUPUIS, Marius (Hrsg.)  
An Open Standard for the Description of Roads in Driving Simulations  
OpenDRIVE, 2006
- [DUP15] DUPUIS, Marius  
OpenDRIVE®, Format Specification, Rev. 1.4  
OpenDRIVE, 2015
- [DUP19] DUPUIS, Marius  
OpenDRIVE®, Format Specification, Rev. 1.5  
OpenDRIVE, 2019
- [DUR95] DURTH  
Richtlinien für die Anlage von Strassen RAS  
Teil: Linienführung RAS-L  
Kirschbaum  
Bonn, 1995
- [ECK17] ECKSTEIN L., ZLOCKI A., PÜTZ A.  
Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen mithilfe einer  
Datenbank relevanter Szenarien  
Pegasus, 2017
- [ECK18] ECKSTEIN LUTZ, ZLOCKI ADRIAN, KLIMKE JENS, KRAJEWSKI ROBERT,  
BOCK JULIAN, SAUERBIER JAN  
Data Basis for Scenario-Based Validation of HAD on Highways  
27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2018
- [ERL07] ERLEMANN, et al.  
Objektorientierte mikroskopische Verkehrsflusssimulation  
Promotion  
Ruhr-Universität Bochum, 2007
- [EXT19] EXTREMETECH  
Laserscanner  
<https://www.extremetech.com/extreme/213517-a-laser-and-a-raspberry-pi-can-disable-a-self-driving-car>, 2019

- [GER09] GERLACH, Jürgen  
Richtlinien für integrierte Netzgestaltung  
RIN  
FGSV-Verl.  
Köln, Ausg. 2008 Auflage, 2009
- [HAR13] HARTKOPF, G.  
Richtlinien für die Anlage von Landstraßen RAL  
FGVS-Verl.  
Köln, 2013
- [KOR17] PETER KORZENIETZ  
Entwicklung einer funktionalen Referenzarchitektur Entwicklung einer  
funktionalen Referenzarchitektur für Assistenzsysteme zur  
energetischen Optimierung des Fahrzeugbetriebs  
Promotion  
Technischen Universität Darmstadt, 2017
- [LÖT01] LÖTHER, Wilfried  
Straßenbau-Praxis  
Straßenplanung ; Straßenbautechnik ; ökologisch orientiert  
Bauwerk-Verl.  
Berlin, 2001
- [MAU15] MAURER, Markus, et al.  
Autonomes Fahren  
Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [MEN17] MENZEL T.  
Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten  
Fahrzeugen  
Pegasus, 2017
- [OST91] OSTERLOH, Horst  
Strassenplanung mit Klothoiden und Schleppkurven  
Einrechnung von Trasse und Gradiente  
Bauverlag  
Wiesbaden, 5. neubearbeitete und erweterte Auflage Auflage, 1991
- [PAY17] PAYÁ-VAYÁ, Guillermo; BLUME, Holger (Hrsg.)  
Towards a common software/hardware methodology for future  
advanced driver assistance systems  
The DESERVE approachRiver Publishers series in transport  
technology  
River Publishers  
Gistrup, Denmark, 2017
- [PIE00] PIETZSCH, Wolfgang  
Strassenplanung  
Werner

- Düsseldorf, 6., neubearb. und erw. Aufl. Auflage, 2000
- [PRE19] PREH- AUTOMOTIVE  
HMI, Schalter, Elektromobilität für die Automobilindustrie  
<https://www.preh.com/>, abgerufen am: 07.06.2019
- [RES19] RESSEL, Wolfram  
Entwässerungsschwache Zonen auf Straßen  
Sicherheitsanforderungen für Sicherheitsanforderungen für Planung, Betrieb und Bautechnik, 2019
- [ROH08] ROHLOFF, M.  
Richtlinien für die Anlage von Autobahnen  
RAA ; R1  
FGSV-Verl.  
Köln, Ausgabe 2008 Auflage, 2008
- [SPE17] SPEKTRUM.DE  
Klothoide  
<https://www.spektrum.de/lexikon/mathematik/klothoide/5270>,  
abgerufen am: 15.05.2019  
Spektrum.de, 2017
- [SPI08] SPIEGEL ONLINE  
Deutschlands erster Stau: Apokalypse auf der Autobahn - SPIEGEL  
ONLINE  
<https://www.spiegel.de/einestages/deutschlands-erster-stau-a-946865.html>, abgerufen am: 07.06.2019  
Hamburg, Germany, 2008
- [STR19] STRÄßen NRW  
Straßenbauplanung in NRW  
<https://www.strassen.nrw.de/de/planung-bau/mit-planung-zum-bau.html>, abgerufen am: 26.03.2019, 2019
- [UNI19] UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN  
Trajektorienplanung  
<https://www.unibw.de/tas/forschung/trajektorienplanung/view>,  
abgerufen am: 07.06.2019, 2019
- [VIR19a] VIRES  
VIRES Simulationstechnologie GmbH  
<https://vires.com/>, abgerufen am: 07.06.2019, 2019
- [VIR19b] VIRES SIMULATIONSTECHNOLOGIE GMBH  
OpenDRIVE  
<http://opendrive.org/>, abgerufen am: 16.04.2019, 2019
- [VOR88] VORTISCH, Peter  
Mikroskopische Verkehrsflußsimulation zur Bewertung  
emissionsmindernder Maßnahmen im Straßenverkehr  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1988
- [WIN15] WINNER, Hermann, et al. (Hrsg.)  
Handbuch Fahrerassistenzsysteme  
Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und  
KomfortATZ/MTZ-Fachbuch

- Springer Vieweg  
Wiesbaden, 3., überarbeitete und ergänzte Auflage Auflage, 2015
- [WOL13] WOLF, Günter, et al.  
Straßenplanung  
Werner Verlag, 8. Aufl. Auflage, 2013

## 11 Anhang

### 11.1 Additionstheoreme

$$\sin(x) \cdot \cos(y) = \frac{1}{2} \cdot (\sin(x-y) + \cos(x+y)) \quad \text{Gl. 11-1}$$

$$\sin^2(x) = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(2x)) \quad \text{Gl. 11-2}$$

### 11.2 Reihenentwicklung der trigonometrischen Funktionen

$$\sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} \pm \dots \quad \text{Gl. 11-3}$$

$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} \pm \dots \quad \text{Gl. 11-4}$$

### 11.3 Eindeutigen Bestimmung der Lage der Vektoren zueinander

In den folgenden Abbildungen dieses Kapitels werden Abkürzungen genutzt, die die folgenden Bedeutungen haben:

- Schnittpunkt (SP)
- Verbundkurve (VK)
- Gerade (G)
- Ja (J), Nein(N)

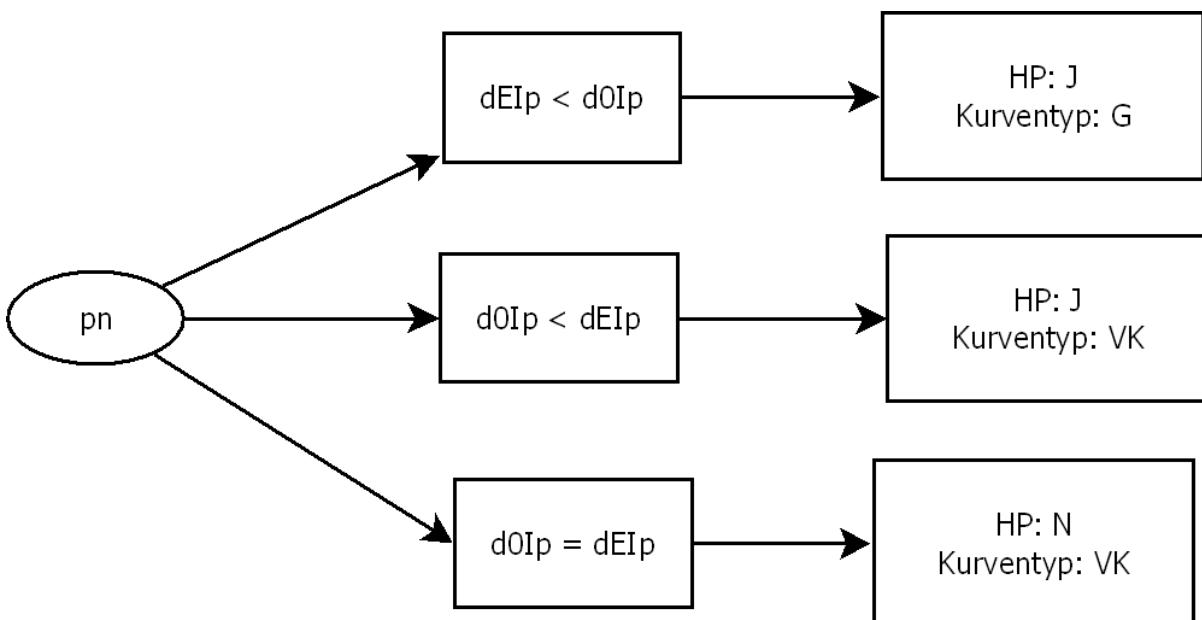


Abb. 11-1: Vorgehen zur eindeutigen Bestimmung der Lage der Vektoren für die Schnittpunktart „pn“

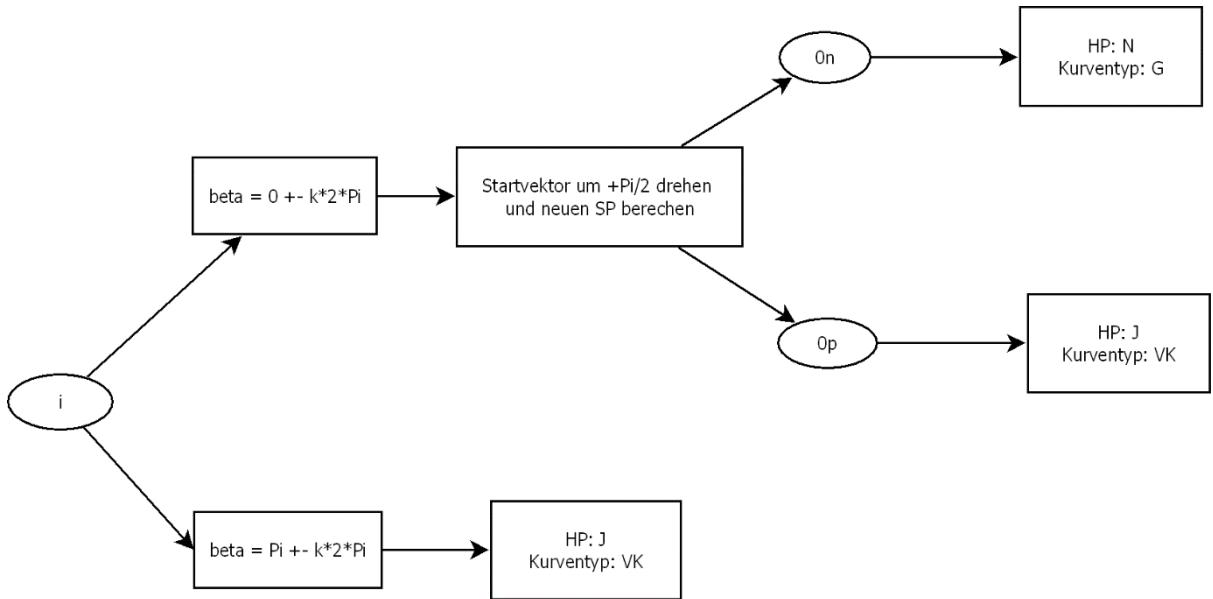


Abb. 11-2: Vorgehen zur eindeutigen Bestimmung der Lage der Vektoren für die Schnittpunktart „i“

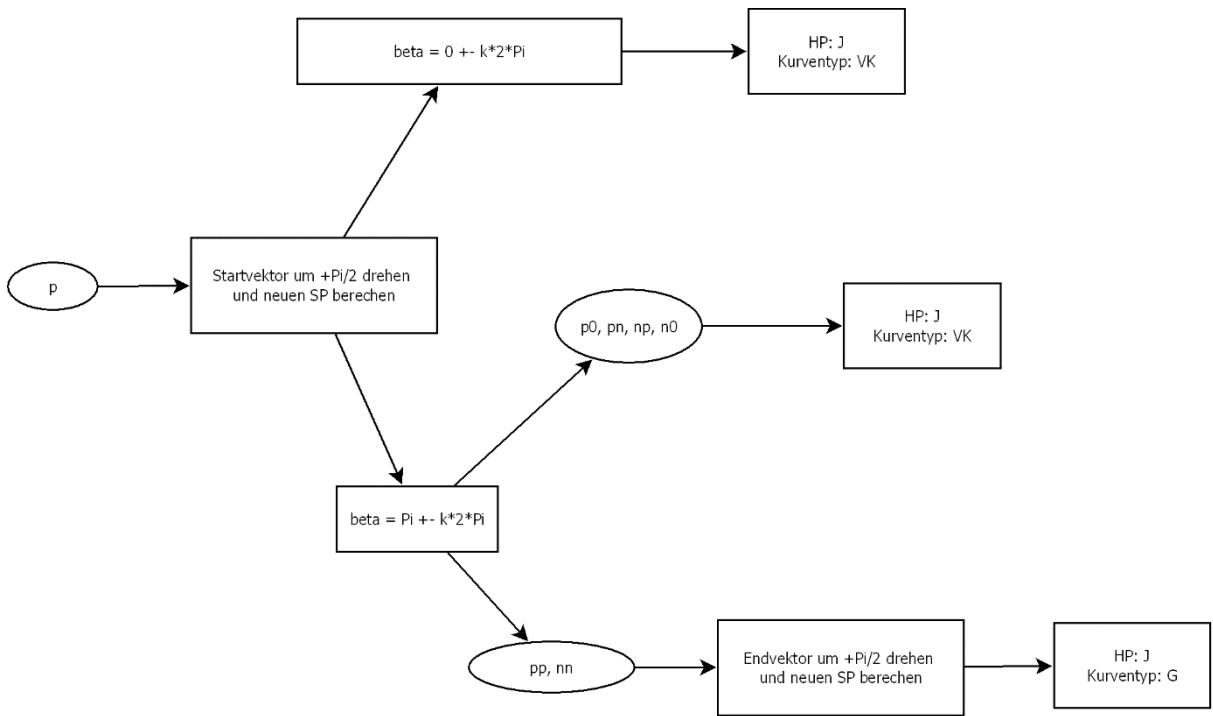


Abb. 11-3: Vorgehen zur eindeutigen Bestimmung der Lage der Vektoren für die Schnittpunktart „p“

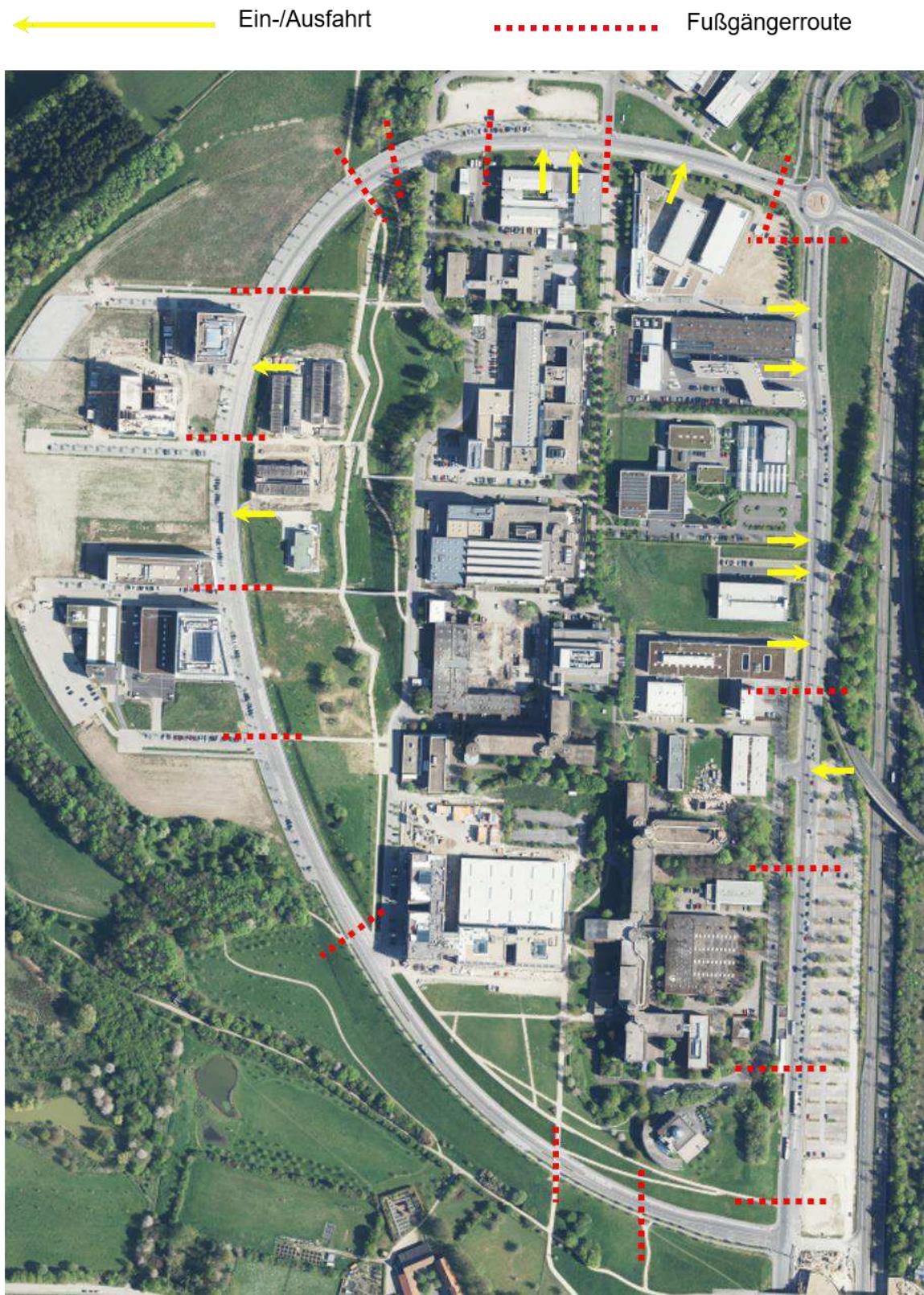
**11.4 Analyse zum Aufbau eines realen Straßennetzes – Verkehrseinflüsse**

Abb. 11-4: Einteilung eines Straßennetzes in Verkehrseinflüsse am Beispiel des Campus-Boulevard

## 11.5 Handbuch

In diesem Kapitel wird die Syntax der Inputdatei eindeutig definiert. Dabei werden alle möglichen Einträge erläutert, sowie deren hierarchische Struktur dargestellt. Die einzelnen Tags werden gesondert betrachtet, wobei auf die Schreibweise, den Vorläufer (engl. parent) und die zugehörigen Attribute eingegangen wird. Die Anzahl der möglichen Instanzen gibt die Notwendigkeit bzw. die Optionalität der einzelnen Tags wieder.

Kommt in der hierarchischen Struktur ein Name der Syntax (engl. Tag) mehrmals vor, so werden nur beim ersten Mal seine weiteren Unterebenen dargestellt. Die wiederholenden Tags sind alle identisch aufgebaut, allerdings dient die verkürzte Darstellung der besseren Übersicht.

Tag	Ebene
<b>roadNetwork</b>	0
-segments	1
-junctions	2
-tJunction	3
-mainRoad	4
-road	5
-type	6
-planView	6
-referenceLine	7
-geometry	8
-line	9
-arc	9
-spiral	9
-elevationProfile	6
-elevationPoint	7
-elevationRadius	7

-lateralProfile	6
-lateralPoint	7
-lanes	6
-laneSection	7
-leftLanes	8
-lane	9
-laneWidth	10
-constantWidth	11
-laneWidening	11
-restrictedArea	12
-changeMark	13
-laneDrop	11
-restrictedArea	12
-roadMark	10
-material	10
-centerLine	8
-rightLanes	8
-accessRoad	4
-road	5
-intersectionPoint	4
-coupler	4
-couplerArea	5
-streetBorder	6
-laneBorder	7

-connection	5
-roadLink	6
-laneLink	7
-objects	4
-signals	5
-markings	6
-position	7
-absolute	8
-relative	8
-repeat	8
-trafficRules	6
-roadSigns	7
-position	8
-trafficLights	7
-position	8
-controller	7
-control	8
-streetLighting	6
-position	7
-roadworks	6
-position	7
-busStops	5
-onTheStreet	6
-position	7

-busCape	6
-position	7
-busStopBay	6
-position	7
-parkingSpace	5
-alongLine	6
-position	7
-angleToLine	6
-position	7
-trafficIsland	5
-mitVerschwenkung	6
-position	7
-ohneVorschwenkung	6
-position	7
-others	5
-area	6
-outerPoint	7
-position	8
-connectingRadius	7
-xJunction	3
-mainRoad	4
-road	5
-accessRoad	4
-road	5

<b>    -coupler</b>	4
<b>    -intersectionPoint</b>	4
<b>   -nJunction</b>	3
<b>    -mainRoad</b>	4
<b>    -road</b>	5
<b>    -accessRoad</b>	4
<b>    -road</b>	5
<b>    -coupler</b>	4
<b>    -intersectionPoint</b>	4
<b>   -roundabout</b>	2
<b>   -connectingRoad</b>	2
<b>   -road</b>	3
<b>-interfaces</b>	1
<b>   -segmentLink</b>	2
<b>   -roadLink</b>	3
<b>-closeRoadNetwork</b>	1
<b>   -connectingPoints</b>	2

### **roadNetwork**

Der oberste umschließende Tag der Datei beschreibt das gesamte Straßennetz.

Schreibweise	<roadNetwork>...</roadNetwork>
Vorläufer	none
Instanzen	1
Attribute	none

### **segments**

Umfasst die Summe aller einzelnen Segmente. Darunter fallen Kreuzungen, Kreisverkehre und Verbindungsstraßen.

Schreibweise	<segments>...</segments>
Vorläufer	< <b>roadNetwork</b> >
Instanzen	1
Attribute	none

### **junctions**

Die Kreuzungen sind der Oberbegriff für T-, X- und N-Kreuzungen.

Schreibweise	<junctions>...</junctions>
Vorläufer	< <b>segments</b> >
Instanzen	1
Attribute	none

### **tJunction**

Dieser Tag beinhaltet die Informationen des Segmentes einer T-Kreuzung. Über die Angabe des Typs der T-Kreuzung können vom Tool Voreinstellungen für die Parameter getroffen werden. Dabei ist die Anzahl der Haupt- und Nebenstraßen relevant.

Schreibweise	<tJunction>...</tJunction>
Vorläufer	< <b>junctions</b> >
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	String		JT1, JT2, JT3, ...	Identifikationsbezeichnung der T-Kreuzung
type	String		M1A,3A	Typ der T-Kreuzung. Eine Hauptstraße und eine Nebenstraße (M1A). Drei Nebenstraßen (3A)

### **xJunction**

Dieser Tag beinhaltet die Informationen des Segmentes einer X-Kreuzung. Über die Angabe des Typs der X-Kreuzung können vom Tool Voreinstellungen für die Parameter getroffen werden. Dabei ist die Anzahl der Haupt- und Nebenstraßen relevant.

Schreibweise	<xJunction>...</xJunction>
Vorläufer	< <b>junctions</b> >
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	String		JX1, JX2, JX3, ...	Identifikationsbezeichnung der X-Kreuzung
type	String		M2A, 4A, 2M	Typ der X-Kreuzung. Eine Hauptstraße und zwei Nebenstraße (M2A). Vier Nebenstraßen (4A). Zwei Hauptstraßen (2M)

### nJunction

Dieser Tag beinhaltet die Informationen des Segmentes einer N-Kreuzung.

Schreibweise                    <nJunction>...</nJunction>

Vorläufer                      <junctions>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	String		JN1, JN2, JN3, ...	Identifikationsbezeichnung der N-Kreuzung

### roundabout

Dieser Tag beinhaltet die Informationen des Segmentes eines Kreisverkehrs. Über die Angabe des Kreisverkehrstyps können vom Tool Voreinstellungen für die Parameter getroffen werden. Dabei werden nach der Größe der Kreisverkehre und der daraus resultierenden Verkehrsführung unterschieden.

Schreibweise                    <roundabout>...</roundabout>

Vorläufer                      <segments>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	String		RA1, RA2, RA3, ...	Identifikationsbezeichnung der Kreisverkehre
type	String		MR, LR, BR	Typ der Kreisverkehre. Minikreisverkehr mit überfahrbarer Mittelinsel (MR - mini Roundabout).

				Kleiner Kreisverkehr (LR - large Roundabout). Großer Kreisverkehr mit Lichtsignalanlage (BR - big Roundabout)
--	--	--	--	--

### connectingRoad

Dieser Tag beinhaltet die Informationen des Segmentes einer Verbindungsstraße.

Schreibweise                    <connectingRoad>...</connectingRoad>

Vorläufer                      <segments>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	String		CR1, CR2, CR3,...	Identifikationsbezeichnung der Verbindungsstraße

### mainRoad

Im folgende Tag wird eine Hauptstraße beschreiben. Dabei werden der Straße, dessen Start- und Endpunkt Identifikationsbezeichnungen zugewiesen.

Schreibweise                    <mainRoad>...</mainRoad>

Vorläufer                      <tJunction> / <xJunction> / <nJunction> / <roundabout> /  
<connectingRoad>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		M1, M2, M3, ..	Identifikationsbezeichnung der Hauptstraße
idStart	string		M1S, M2S, ...	Identifikationsbezeichnung des Startpunktes der Hauptstraße
idEnd	string		M1E, M2E, ...	Identifikationsbezeichnung des Endpunktes der Hauptstraße

### accessRoad

Dieser Tag beschreibt eine Nebenstraße. Dabei werden der Straße, dessen Start- und Endpunkt Identifikationsbezeichnungen zugewiesen.

Schreibweise	<accessRoad>...</accessRoad>
Vorläufer	<tJunction> / <xJunction> / <nJunction> / <roundabout> / <connectingRoad>
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		A1, A2, A3, ...	Identifikationsbezeichnung der Nebenstraße
idStart	string		A1S, A2S, ...	Identifikationsbezeichnung des Stratpunktes der Nebenstraße
idEnd	string		A1E, A2E, ...	Identifikationsbezeichnung des Endpunktes der Nebenstraße

### road

In diesem Tag wird eine individuelle Straße und die zugehörigen Parameter beschrieben.

Schreibweise	<road>...</road>
Vorläufer	<mainRoad> / <accessRoad>
Instanzen	1...n

Attribute **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
name	string			Straßenname
length	double	m	[0, ∞[	Länge der Straße

### type

Der Typ einer Straße dient zur Kategorisierung und liefert weiterhin für das Tool relevante Voreinstellungen der Parameter. Ein Straßentyp ist so lange gültig, bis ein neuer definiert wird.

Schreibweise	<type>...</type>
Vorläufer	<road>
Instanzen	1...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
sOffset	double	m	[0, ∞[	Startposition des Straßentyps in s-Koordinaten
type	string		Spielstraße, Stadtstraße, Landstraße, Autobahn, Fahrradweg, Gehweg	Typ der Straße

### planView

Dieser Tag beschreibt den Verlauf der Straße aus der Vogelperspektive.

Schreibweise	<planView>...</planView>
Vorläufer	<road>
Instanzen	1
Attribute	none

### referenceLine

In diesem Tag wird der geometrische Verlauf der Referenzlinie in der x/y-Ebene beschrieben.

Schreibweise	<referenceLine>...</referenceLine>
Vorläufer	<planView>
Instanzen	1
Attribute	none

### geometry

Unter diesem Tag werden die Geometrien der Referenzlinie festgelegt. Die Geometrien entsprechen Geraden, Kreisbögen oder Spiralen. Eine Geometrie wird immer an das Ende oder den Anfang einer bestehenden Geometrie gesetzt. Damit eine Geometrie im Ursprung des straßenbezogenen Koordinatensystems startet, muss für die Parameter „connectToEndOf“ und „connectToStartOf“ der Wert „0“ angegeben werden.

Für die Angabe der Radien wird festgelegt, dass positive Radien eine Linkskrümmung bewirken und negative Radien eine rechtsgekrümmte Kurve darstellen.

Schreibweise	<geometry>...</geometry>
Vorläufer	<referenceLine>
Instanzen	1...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		G1, G2, G3,...	Identifikationsbezeichnung der Geometrie
length	double	m	[0, ∞[	Länge der Geometrie
connectToEndOf	string		0, G1, G2, G3,...	Beginne Geometrie im Endpunkt der genannten Geometrie
connectToStartOf	string		0, G1, G2, G3,...	Beginne Geometrie im Startpunkt der genannten Geometrie

### line

Dieser Tag beschreibt den Geometriertyp einer Geraden, als Teil der Referenzlinie.

Schreibweise	<line.../>
Vorläufer	<geometry>
Instanzen	0...n
Attribute	none

### arc

Der Kreisbogen wird über einen konstanten Radius definiert und wird als geometrischer Teil der Referenzlinie genutzt.

Schreibweise	<arc.../>
Vorläufer	<geometry>
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
R	double	m	]~∞, ∞[	Konstanter Radius des Kreisbogens

### spiral

Im folgenden Tag wird das geometrische Element der Klo thoide beschrieben. Diese besitzt eine konstant ändernde Krümmung und wird hier über ihren Start und Endradius definiert

Schreibweise	<spiral.../>
Vorläufer	<geometry>
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
Rs	double	m	] $-\infty$ , $\infty$ [	Radius im Startpunkt der Klothoide
Re	double	m	] $-\infty$ , $\infty$ [	Radius im Endpunkt der Klothoide

### elevationProfile

Der Tag beschreibt das Höhenprofil der Straße.

Schreibweise	<elevationProfile>...</elevationProfile>
Vorläufer	<road>
Instanzen	0...n
Attribute	none

### elevationPoint

In diesem Tag werden Höhenpunkte definiert, wobei die einzelnen Höhenwerte in Abhängigkeit der mitbewegten s-Koordinate angegeben werden.

Schreibweise	<elevationPoint.../>
Vorläufer	<elevationProfile>
Instanzen	2...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		EP1, EP2, EP3,...	Identifikationsbezeichnung des Höhenpunktes
s	double	m	[0, $\infty$ [	s-Koordinate des Höhenpunktes
z	double	m	] $-\infty$ , $\infty$ [	z-Koordinate des Höhenpunktes (Höhenmeter)

### elevationRadius

Jeder Punkt des Höhenverlaufs wird durch Kuppen und Wannen ausgerundet. Die Ausrundung erfolgt hier idealisiert durch Kreisbögen. Eindeutig definiert wird dies durch die Angabe eines Höhenpunktes und dem dazugehörigen Ausrundungsradius.

Schreibweise	<elevationRadius.../>
Vorläufer	<elevationProfile>
Instanzen	1...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
pointId	string		EP1, EP2, EP3,...	Identifikationsbezeichnung des Höhenpunktes, der ausgerundet werden soll
R	double	m	Abhängig von Straßenkategorie und Planungsgeschwindigkeit	Radius der Ausrundung

### **lateralProfile**

Das Querprofil der Straße kann in Abhängigkeit der mitlaufenden Koordinate s definiert werden. Der laterale Verlauf wird durch lineare, quadratische oder kubische Funktionen beschrieben.

Schreibweise                    <lateralProfile>...</lateralProfile>

Vorläufer                      <road>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		LP1, LP2, LP3,...	Identifikationsbezeichnung des Querprofils
s	double	[0, ∞[		s-Koordinate des Querprofils
degree	int		1,2,3	Der Grad der Funktion, die das Querprofil beschreibt

### **lateralPoint**

Das Querprofil wird durch die Angabe von Stützstellen berechnet. Die Stützstellen können durch einzelne Koordinaten oder Steigungen des Querprofils angegeben werden. Abhängig vom Grad der Funktion des Querprofils sind dementsprechend viele Stützstellen notwendig.

Schreibweise                    <lateralPoint.../>

Vorläufer                      <lateralProfile>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		LP1, LP2, LP3,...	Identifikationsbezeichnung des lateralen Punktes
t	double	m	[0, $\infty$ [	t-Koordinate des Höhenpunktes
h	double	m	] $-\infty$ , $\infty$ [	z-Koordinate des Höhenpunktes des Querprofils
gradient	double	$^{\circ}$	[- $\pi$ , $\pi$ ]	Steigung des Querprofils

### lanes

In diesem Tag werden die parallel zur Referenzlinie verlaufenden Fahrbahnen definiert.

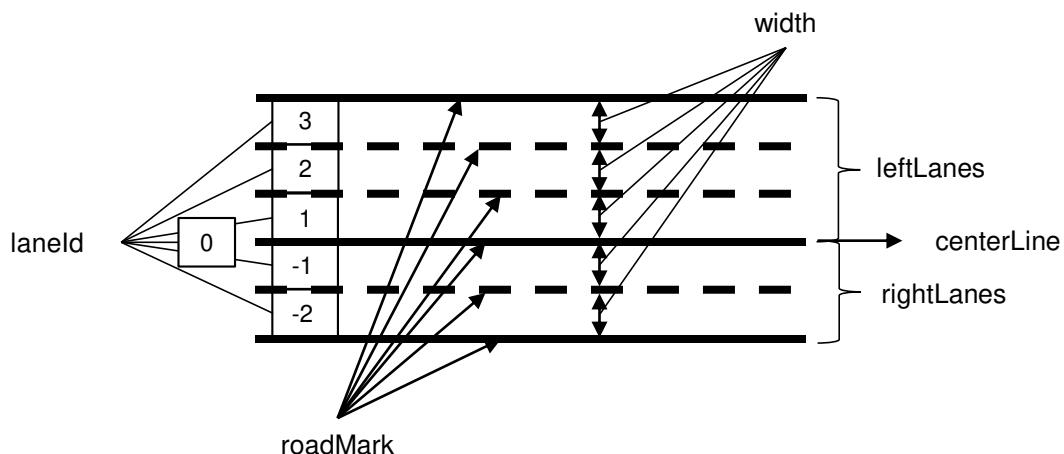
Schreibweise                    <lanes>...</lanes>

Vorläufer                    <road>

Instanzen                    1

Attribute                    none

Visualisierung



### laneSection

Eine Straße lässt sich in einzelne Streckenabschnitte gliedern. Innerhalb eines Streckenabschnittes sollte die Anzahl der Fahrbahnen konstant sein. Ein Streckenabschnitt ist solange gültig, bis ein neuer Streckenabschnitt definiert wird.

Schreibweise                    <laneSection>...</laneSection>

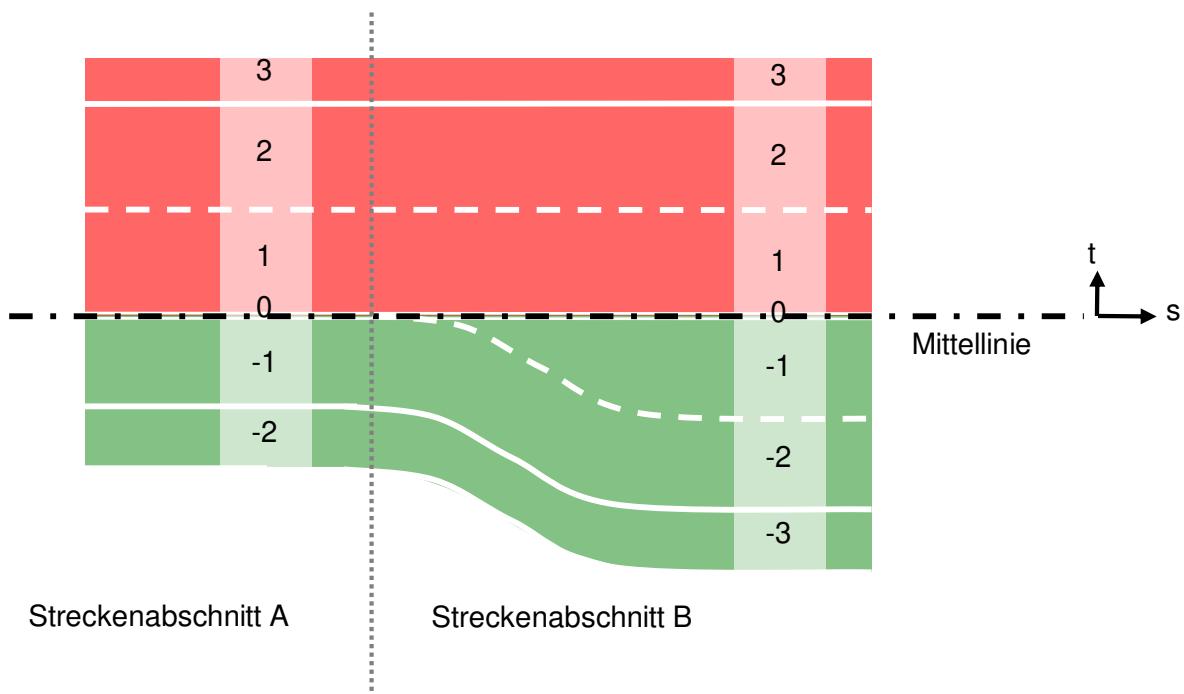
Vorläufer                    <lanes>

Instanzen                    1...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string			Identifikationsbezeichnung des Streckenabschnittes
s	double		[0, $\infty$ [	Beginn eines neuen Streckenabschnittes, angegeben in s-Koordinaten

### Visualisierung



### **leftLanes**

Die Fahrbahnen auf der linken Seite bzw. die oberhalb der Referenzlinie werden für eine bessere Übersicht zu einer Gruppe zusammengefasst.

Schreibweise	<code>&lt;leftLanes&gt;...&lt;/leftLanes&gt;</code>
Vorläufer	<code>&lt;laneSection&gt;</code>
Instanzen	0...1
Attribute	none

### **lane**

Dieser Tag befasst sich mit der genauen Definition der Eigenschaften einer Fahrbahn.

Schreibweise	<code>&lt;lane&gt;...&lt;/lane&gt;</code>
Vorläufer	<code>&lt;leftLanes&gt; / &lt;centerLine&gt; / &lt;rightLanes&gt;</code>

Instanzen                    1...n  
 Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
laneld	string		]- ∞, ∞[	Identifikationsbezeichnung der Fahrbahn
type	string		Fahrstreifen, Radweg, Gehweg, Sperrfläche, Parkstreifen, Seitenstreifen	Typ der Fahrbahn

### **laneWidth**

Der Tag umfasst die Fahrbahnbreite und dessen Veränderungen über die Länge.

Schreibweise                <laneWidth>...</laneWidth>  
 Vorläufer                   <lane>  
 Instanzen                   1  
 Attribute                   none

### **constantWidth**

In diesem Tag wird eine konstanten Fahrbahnbreite definiert.

Schreibweise                <constantWidth.../>  
 Vorläufer                   <laneWidth>  
 Instanzen                   1  
 Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
sOffset	double	m	[0, ∞[	Startposition in s-Koordinaten in Abhängigkeit der zugehörigen laneSection
w	double	m	[0, ∞[	Breite des Fahrstreifens

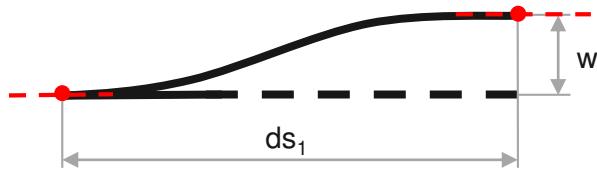
### **laneWidening**

Eine Fahrbahnerweiterung wird in Bezug zum mitbewegten Koordinatensystem angegeben. Die Zunahme der Fahrbahnbreite wird über ein Polynom dritten Grades beschrieben. Allein die Information der Länge, über die sich die Fahrbahnbreite bis auf die vollständige Breite aufbauen soll, definiert das Polynom.

Schreibweise	<code>&lt;laneWidening&gt;...&lt;/laneWidening&gt;</code>
Vorläufer	<code>&lt;laneWidth&gt;</code>
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
sOffset	double	m	[0, $\infty$ [	Startposition des ersten Polynoms in s-Koordinaten in Abhängigkeit der zugehörigen laneSection
ds <sub>1</sub>	double	m	[0, $\infty$ [	Länge in s-Koordinaten über die sich die Spurerweiterung bzw. das Polynom aufbauen soll

### Visualisierung



### restrictedArea

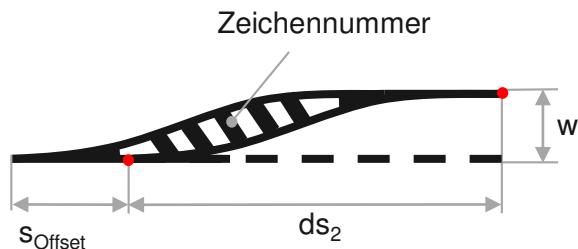
Eine Sperrfläche wird von zwei Polynomen dritten Grades eingeschlossen. Dabei wird das zweite Polynom, wie im vorherigen Abschnitt, durch eine Länge entlang der s-Koordinate bestimmt. Die Markierungen der Sperrfläche lassen sich durch eine Zeichennummer, die in der StVO definiert ist, angeben.

Schreibweise	<code>&lt;restrictedArea&gt;...&lt;/restrictedArea&gt;</code>
Vorläufer	<code>&lt;laneWidening&gt; / &lt;laneDrop&gt;</code>
Instanzen	0...1
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
signNumber	int		In der StVO definierte Nummern	Die Sperrfläche ist in der StVO genormt

sOffset	double	m	[0, $\infty$ [	Startposition des zweiten Polynoms in s-Koordinaten in Abhängigkeit des Startpunktes des ersten Polynoms
ds <sub>2</sub>	double	m	[0, $\infty$ [	Länge in s-Koordinaten über die sich die Spurerweiterung bzw. das Polynom aufbauen soll

Visualisierung



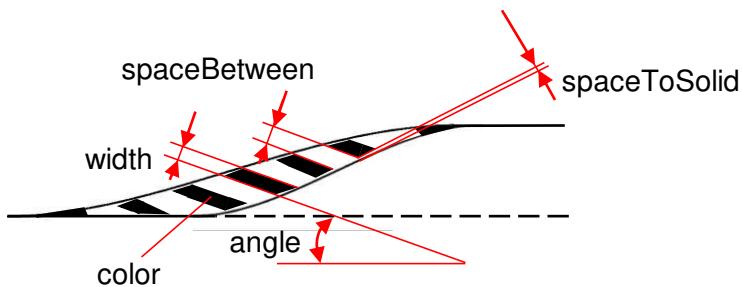
### changeMark

Eine Änderung der Sperrflachenmarkierung ist anhand folgender in der Abbildung erläuterten Parametern möglich.

Schreibweise	<changeMark.../>
Vorläufer	<restrictedArea>
Instanzen	1
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
angle	double	°	[0, $\infty$ [	Winkel der Quermarkierung
color	string		weiß, orange, blau, grün	Farbe der Straenmarkierung
width	double	m	[0, $\infty$ [	Breite der Quermarkierungen
spaceBetween	double	m	[0, $\infty$ [	Lateraler Abstand zwischen den Quermarkierungen
spaceToSolid	double	m	[0, $\infty$ [	Longitudinaler Abstand der Quermarkierungen

Visualisierung



### **laneDrop**

Für eine Fahrbahnverengung gelten die gleichen Bedingungen wie für die Fahrbahnerweiterung. In diesem Fall baut sich die Fahrbahnbreite allerdings über die Länge ab.

Schreibweise                   <laneDrop>...</laneDrop>

Vorläufer                   <laneWidth>

Instanzen                   0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
sOffset	double	m	[0, ∞[	Startposition des ersten Polynoms in s-Koordinaten in Abhängigkeit der zugehörigen laneSection
ds1	double	m	[0, ∞[	Länge in s-Koordinaten über die sich die Spurerweiterung bzw. das Polynom abbauen soll

### **roadMark**

Die Angabe der Straßenmarkierungen geht immer von der äußeren Kante der jeweiligen Fahrbahnbreite, betrachtet aus dessen Fahrtrichtung, aus.

Schreibweise                   <roadMark.../>

Vorläufer                   <lane> / <markings>

Instanzen                   1

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
sOffset	double	m	[0, ∞[	Startposition der Längsmarkierung in s-Koordinaten in Abhängigkeit der zugehörigen laneSection
tOffset	double	m	[0, ∞[	Startposition der Längsmarkierung in t-Koordinaten in Abhängigkeit der zugehörigen laneSection
type	string		Solid, broken, solid solid, solid broken, broken solid, broken broken	Typ der Straßenmarkierung (Orientierung bei Doppellinien von innen nach außen, Für die Mittellinie von links nach rechts)
color	string		weiß, orange, blau, grün	Farbe der Straßenmarkierung
width	double	m	[0, ∞[	Breite der Straßenmarkierung
lengthOfMark	double	m		Länge der gestrichelten Markierung

### material

Durch die Definition eines Fahrbahnmaterials kann die Fahrbahnreibung sowie die Oberflächenrauheit ermittelt werden. Die Angaben für das Material sind so lange gültig, bis für eine s-Koordinate neue Informationen über das Material vorliegen.

Schreibweise	<material.../>
Vorläufer	<lane>
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
sOffset	double	m	[0, ∞[	Startposition in s-Koordinaten in Abhängigkeit der zugehörigen laneSection
surface	string			Oberflächenmaterial
friction	double		[0, ∞[	Reibungswert des Materials

roughness	double		[0, ∞[	Oberflächenrauheit des Materials
-----------	--------	--	--------	----------------------------------

### centerLine

Der Referenzlinie wird eine Fahrbahn zugewiesen, die keine Breite besitzt, nur aus einer Straßenmarkierung besteht und als Mittellinie bezeichnet wird.

Schreibweise	<centerLine>...</centerLine>
Vorläufer	<laneSection>
Instanzen	0...1
Attribute	none

### rightLanes

Die Fahrbahnen auf der rechten Seite bzw. die unterhalb der Referenzlinie werden für eine bessere Übersicht zu einer Gruppe zusammengefasst.

Schreibweise	<rightLanes>...</rightLanes>
Vorläufer	<laneSection>
Instanzen	0...1
Attribute	none

### intersectionPoint

Zur Erstellung einer Kreuzung aus zwei einzelnen Straßen, ist die Angabe eines Kreuzungsmittelpunktes notwendig. Dafür wird zunächst eine der Straßen fixiert und dessen Koordinatensystem für das gesamte Segment festgelegt. In s-Koordinaten, ausgehend von dem jeweiligen Startpunkt der Straßen, wird auf beiden Straßen die Lage des Kreuzungsmittelpunktes definiert. Durch die Angabe eines Differenzwinkels zwischen den beiden Straßen, können diese eindeutig zueinander positioniert werden.

Schreibweise	<intersectionPoint>...</intersectionPoint>
Vorläufer	<tJunction> / <xJunction> / <nJunction> / <roundabout>
Instanzen	1...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
setReferenceRoad	string			Straße, die als Referenz festgelegt wird, sodass das Koordinatensystem der Straße für das gesamte Segment referenziert wird

adRoadId	string			Straße, die relativ zur Referenzstraße gedreht und verschoben werden soll
angleToReferenceRoad	double	rad	[0, ∞[	Winkel, den die Straße zur Referenzstraße besitzen soll
iPOnMainRoad	double	m	[0, ∞[	Position des Schnittpunktes auf der Referenzstraße
iPOnAccessRoad	double	m	[0, ∞[	Position des Schnittpunktes auf der zu positionierenden Straße

### **coupler**

In diesem Tag wird der Kreuzungsbereich definiert und die Spurführung in einer Kreuzung erstellt.

Schreibweise	<coupler>...</coupler>
Vorläufer	<tJunction> / <xJunction> / <nJunction> / <roundabout>
Instanzen	1...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		CL1, CL2, CL3, ...	Identifikationsbezeichnung der Fahrbahn

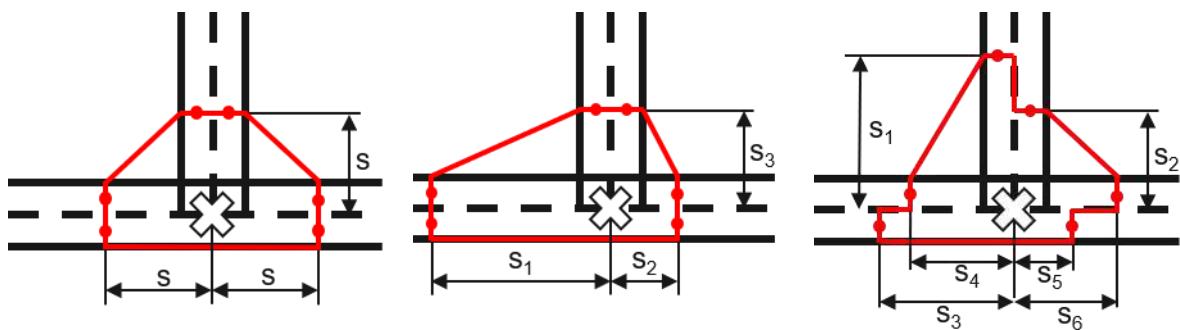
### **couplerArea**

Die Grenzen des Kreuzungsbereiches werden vom Kreuzungsmittelpunkt aus definiert. Diese können sowohl symmetrisch als auch unsymmetrisch ausgeführt sein. Für den symmetrischen Fall reicht die Angabe einer Länge, sodass ausgehend vom Kreuzungsmittelpunkt in jede Straßenrichtung die Grenzen bestimmt werden können.

Schreibweise	<couplerArea>...</couplerArea>
Vorläufer	<coupler>
Instanzen	1
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
type	string		sym, unsym	Für den symmetrischen (sym) Typen reicht die einmalige Angabe eines sOffsets unter diesem Tag. Für den unsymmetrischen (unsym) Fall müssen die sOffsets für die einzelnen Straßen oder Fahrspuren angegeben werden.
sOffset	double	m	[0, $\infty$ [	Startposition in s-Koordinaten ausgehend vom Kreuzungsmittelpunkt

### Visualisierung



(a) Symmetrischer Kreuzungsbereich

(b) Unsymmetrisch für jede Straße einzeln

(c) Unsymmetrisch für jede Fahrspur einzeln

### streetBorder

Für einen unsymmetrischen Kreuzungsbereich können die Grenzen ausgehend vom Kreuzungsmittelpunkt für jede Straßenrichtung individuell angegeben werden.

Schreibweise

<streetBorder>...</streetBorder>

Vorläufer

<couplerArea>

Instanzen

0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
roadId	string			Angabe der Straßenbezeichnung auf der die Grenze des Kreuzungsbereiches definiert wird
sOffset	double	m	[0, ∞[	Abstand in s-Koordinaten ausgehend vom Kreuzungsmittelpunkt in Richtung der Straße

### **laneBorder**

Der höchste Detaillierungsgrad bei der Definition des Kreuzungsbereiches entsteht durch die individuelle Angabe der Bereichsgrenzen für jede Fahrbahn.

Schreibweise                    <laneBorder.../>

Vorläufer                      <**streetBorder**>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
laneld	string			Angabe der Fahrspurbezeichnung auf der die Grenze des Kreuzungsbereiches definiert wird
sOffset	double	m	[0, ∞[	Abstand in s-Koordinaten ausgehend vom Kreuzungsmittelpunkt in Richtung der Fahrspur

### **connection**

In diesem Tag werden die Verbindungsstraßen innerhalb des Kreuzungsbereiches erstellt. Für den Fall, dass alle logischen Verbindungsstraßen erstellt werden sollen erfolgt dies automatisiert durch das Tool.

Eine weitere Möglichkeit für eine vollständige individuelle Gestaltung der Verbindungsstraßen ist die Definition einer eigenständigen Straße für jede Verbindung.

Schreibweise                    <connection>...</connection>

Vorläufer                      <**coupler**>

Instanzen                     1

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
type	string		all, single	„all“ steht dafür, dass alle möglichen Fahroutes automatisiert erstellt werden. Für die Erstellung einzelner (single) individueller Straßen ist die Definition der nächsten Tags erforderlich.

### roadLink

Für den Fall, dass die Verbindungsstraßen individuell erstellt werden sollen, gilt es zunächst die Verbindungspunkte zu definieren. Die Verbindungspunkte entstehen durch die Schnittpunkte des Kreuzungsbereiches mit den Referenzlinien.

Schreibweise                    <roadLink>...</roadLink>

Vorläufer                      <connection>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
fromId	string			Angabe des Punktes einer Straße, die den Start der Verbindungsstraße darstellt
told	string			Angabe der des Punktes einer Straße, die das Ende der Verbindungsstraße darstellt

### laneLink

Die Verbindungsstraße wird für jede Fahrbahn der Straße individuell erstellt. Diese besteht aus Geraden und einem Kreisbogen. Durch die Angabe eines Radius, der mindestens erreicht werden soll, lässt sich ein Kreisbogen konstruieren. Dafür werden die Fahrbahnenden tangential in den Kreuzungsbereich verlängert, bis sich jeweils zwei Geraden an den definierten Kreisbogen anschmiegen.

Schreibweise                    <laneLink.../>

Vorläufer                      <roadLink>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
fromId	string			Angabe der des Punktes einer Fahrbahn, die den Start der Verbindungsstraße darstellt
told	string			Angabe der des Punktes einer Fahrbahn, die das Ende der Verbindungsstraße darstellt
minR	double	m	[-∞, ∞[	Kleinster Radius, den der Kreisbogen der Verbindungsstraße besitzen soll

### objects

Dieser Tag beinhaltet alle Informationen zu den Objekten eines Segmentes.

Schreibweise	<objects>...</objects>
Vorläufer	<tJunction> / <xJunction> / <nJunction> / <roundabout> / <connectingRoad>
Instanzen	0...n
Attribute	none

### signals

Objekte, die eine signalisierenden Einfluss auf den Fahrer haben, werden zur besseren Übersicht zu der Gruppe der Signale zusammengefasst.

Schreibweise	<signals>...</signals>
Vorläufer	<objects>
Instanzen	0...n
Attribute	none

### markings

Dieser Tag beschreibt die Straßenmarkierungen. Darunter fallen hauptsächlich Quermarkierungen, Sondermarkierungen sowie Warnmarkierungen.

Schreibweise	<markings>...</markings>
Vorläufer	<signals>
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		MK1, MK2, MK3, ...	Identifikationsbezeichnung der Markierung
signNumber	int		In der StVO definierte Nummern	In der StVO genormte Markierungen

### position

Die Position der einzelnen Objekte wird über diesen Tag bestimmt. Diese kann absolut oder relativ zu Objekten oder Punkten realisiert werden.

Schreibweise	<position>...</position>
Vorläufer	alle Objekte die positioniert werden
Instanzen	1
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		M1, M2, M3, ...	Identifikationsbezeichnung der Position

### absolute

Bei der absoluten Positionierung werden die Positionskoordinaten aus dem Ursprung des Koordinatensystems des Segmentes angegeben.

Schreibweise	<absolute.../>
Vorläufer	<position>
Instanzen	0...1
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
xOffset	double	m	[0, ∞[	Startposition in x-Koordinaten in Abhängigkeit des Koordinatensystems des Segmentes und der zugehörigen Referenzstraße
yOffset	double	m	]-, ∞[	Startposition in y-Koordinaten in Abhängigkeit des Koordinatensystems des Segmentes und der zugehörigen Referenzstraße

zOffset	double	m	]-∞, ∞[	Startposition in z-Koordinaten in Abhängigkeit des Koordinatensystems des Segmentes und der zugehörigen Referenzstraße
hdg	double	rad	]-∞, ∞[	Rotation des Objektes um die z-Achse
roll	double	rad	]-∞, ∞[	Rotation des Objektes um die s-Achse
pitch	double	rad	]-∞, ∞[	Rotation des Objektes um die t-Achse

### relative

Die relative Positionierung bezieht sich auf ein Objekt oder einen bestimmten Punkt des Segmentes.

Schreibweise	<relative.../>
Vorläufer	<position>
Instanzen	0...1
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
relativeObjectId	string			Positionierung relativ zum genannten Objekt
idOf startPoint	string			Positionierung relativ zum genannten Punkt
sOffset	double	m	[0, ∞[	Absatz in s-Koordinaten in Abhängigkeit des gewählten Punktes oder Objektes
tOffset	double	m	]-∞, ∞[	Absatz in t-Koordinaten in Abhängigkeit des gewählten Punktes oder Objektes
zOffset	double	m	]-∞, ∞[	Abstand in z-Koordinaten in Abhängigkeit des gewählten Punktes oder Objektes
hdg	double	rad	]-∞, ∞[	Rotation des Objektes um die z-Achse
roll	double	rad	]-∞, ∞[	Rotation des Objektes um die s-Achse

pitch	double	rad	]-∞, ∞[	Rotation des Objektes um die t-Achse
-------	--------	-----	---------	--------------------------------------

**repeat**

In diesem Tag kann ein bereits bestehendes Objekt durch die Angabe eines Richtungsvektors beliebig oft kopiert und angeordnet werden.

Schreibweise                    <repeat.../>

Vorläufer                      <**position**>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
objectId	string			Positionierung relativ zum genannten Objekt
number	int		[1, ∞[	Anzahl der wiederholenden Objekte
distance	double	m	[0, ∞[	Abstand zwischen zwei Objekten
orientationS	double	m	]-∞, ∞[	Orientierung des Richtungsvektors in s-Richtung vom Ursprung des ersten Objektes aus
orientationT	double	m	]-∞, ∞[	Orientierung des Richtungsvektors in t-Richtung vom Ursprung des ersten Objektes aus
orientationZ	double	m	]-∞, ∞[	Orientierung des Richtungsvektors in z-Richtung vom Ursprung des ersten Objektes aus

**trafficRules**

Die Verhaltensregeln eines Straßennetzes werden durch Verkehrsschilder, Lichtsignalanlage oder die Rechts-vor-Links-Regelung vorgegeben.

Schreibweise                    <trafficRules>...</trafficRules>

Vorläufer                      <**signals**>

Instanzen                     1

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		TR1, TR2, TR3,....	Identifikationsbezeichnung der Verkehrsregeln
type	string		LSA, VS, RvL	Typ der Verkehrsregeln Lichtsignalanlage (LSA), Verkehrsschilder (VS), Rechts-vor-Links (RvL)

### roadSigns

In diesem Tag werden die Verkehrsschilder eines Straßennetzes über die zugehörigen Zeichensnummern der StVO definiert.

Schreibweise                    <roadSigns>...</roadSigns>

Vorläufer                      <**trafficRules**>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		RS1, RS2, RS3, ...	Identifikationsbezeichnung der Verkehrsschilder
signNumber	int		In der StVO definierte Nummern	Die Verkehrsschilder sind in der StVO genormt

### trafficLights

In diesem Tag werden die Lichtsignalanlagen eines Straßennetzes über die zugehörigen Zeichensnummern der StVO definiert.

Schreibweise                    <trafficLights>...</trafficLights>

Vorläufer                      <**trafficRules**>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		TL1, TL2, TL3, ...	Identifikationsbezeichnung der Lichtsignalanlagen
signNumber	int		In der StVO definierte Nummern	Die Lichtsignalanlagen sind in der StVO genormt

### controller

In einer Steuereinheit werden dynamische Verkehrsschilder und Lichtsignalanlagen zusammengefasst, damit diese über eine Schnittstelle angesprochen werden können.

Schreibweise                    <controller>...</controller>

Vorläufer                      <**trafficRules**>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		CR1, CR2, CR3,...	Identifikationsbezeichnung der Steuereinheiten

### control

Über die Identifikationsbezeichnung werden die einzelnen dynamischen Signale der Steuereinheit zugewiesen.

Schreibweise                    <control.../>

Vorläufer                      <**controller**>

Instanzen                     1...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
signalId	string			Angabe der Identifikationsbezeichnungen von Signalen, die zu einer Steuereinheit zusammengefasst werden sollen

### streetLighting

Die Angabe der Straßenbeleuchtung dient der Sicherheit und erhöht den Realitätsgrad des Straßennetzes.

Schreibweise	<streetLighting>...</streetLighting>
Vorläufer	<b>&lt;signals&gt;</b>
Instanzen	0...n
Attribute	ToDo

### **roadworks**

Dieser Tag beinhaltet Objekte, die auf eine Baustelle hinweisen und diese darstellen. Definiert werden diese Objekte über die Zeichennummern der StVO.

Schreibweise	<roadworks>...</roadworks>
Vorläufer	<b>&lt;signals&gt;</b>
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		RW1, RW2, RW3,...	Identifikationsbezeichnung der Baustellenobjekte
signNumber	int		In der StVO definierte Nummern	Die Baustellenobjekte sind in der StVO genormt

### **busStops**

Das Anlegen von Bushaltestellen hat sowohl Einfluss auf die geometrischen Eigenschaften eines Straßennetzes als auch auf die Szenarienvielfalt. Eine genaue Definition der Haltestellenart findet in den folgenden Tags statt.

Schreibweise	<busStops>...</busStops>
Vorläufer	<b>&lt;objects&gt;</b>
Instanzen	0...n
Attribute	none

### **onTheStreet**

Die Bushaltestelle auf der Straße hat keinen Einfluss auf die Straßenführung und besteht lediglich aus einer zugehörigen Straßenmarkierung.

Schreibweise	<onTheStreet>...</onTheStreet>
Vorläufer	<b>&lt;busStops&gt;</b>
Instanzen	0...n
Attribute	ToDo

### **busCape**

Für einen Haltestellenkap wird der Bordstein des Gehweges nur für die Haltestelle bis an die den Fahrbahnrand herangezogen, sodass der Bus die Fahrbahn nicht verlassen muss.

Schreibweise	<busCape>...</busCape>
Vorläufer	< <b>busStops</b> >
Instanzen	0...n
Attribute	ToDo

### **busStopBay**

Eine Haltestellenbucht beschreibt einen Haltebereich für den Bus auf einer separaten Fahrbahn.

Schreibweise	<busStopBay>...</busStopBay>
Vorläufer	< <b>busStops</b> >
Instanzen	0...n
Attribute	ToDo

### **parkingSpace**

Parkflächen entlang der Straße haben einen Einfluss auf das Verkehrsgeschehen und sind somit relevante Objekte des Straßennetzes.

Schreibweise	<parkingSpace>...</parkingSpace>
Vorläufer	< <b>objects</b> >
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		PS1, PS2, PS3,...	Identifikationsbezeichnung der Parkfläche
width	double		[0, ∞[	Breite einer Parkfläche
length	double		[0, ∞[	Länge einer Parkfläche
markings	boolean		true, false	Markierungen der einzelnen Parkfläche

### **alongLine**

Die einzelnen Parkplätze können längs zum Straßenverlauf angeordnet werden.

Schreibweise	<alongLine>...</alongLine>
Vorläufer	< <b>parkingSpace</b> >
Instanzen	0...n
Attribute	ToDo

### **angleToLine**

Die einzelnen Parkplätze können in einem Winkel zur Referenzlinie der Straße angeordnet werden.

Schreibweise	<angleToLine>...</ angleToLine >
Vorläufer	<b>&lt;parkingSpace&gt;</b>
Instanzen	0...n
Attribute	ToDo

### **trafficIsland**

Verkehrsinseln dienen der sichereren Führen der Fußgängerströme über Straßen und verändern den geometrischen Verlauf der Straße.

Schreibweise	<trafficIsland>...</trafficIsland>
Vorläufer	<b>&lt;objects&gt;</b>
Instanzen	0...n
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		TI1, TI 2, TI 3, ...	Identifikationsbezeichnung der Verkehrsinseln

### **mitVerschwenkung**

Bei Verkehrsinseln mit verschwenkter Fahrbahn bleibt die Fahrbahnbreite konstant und die Spurführung verläuft um die Verkehrsinsel.

Schreibweise	<mitVerschwenkung>...</mitVerschwenkung>
Vorläufer	<b>&lt;trafficIsland&gt;</b>
Instanzen	0...n
Attribute	ToDo

### **ohneVerschwenkung**

Bei Verkehrsinseln ohne Verschwenkung der Fahrbahn wird die Insel auf die bestehende Straße gesetzt und die Fahrbahnbreite ist in diesen Bereichen geringer.

Schreibweise	<ohneVerschwenkung>...</ohneVerschwenkung>
Vorläufer	<b>&lt;trafficIsland&gt;</b>
Instanzen	0...n
Attribute	ToDo

### **others**

Fällt ein Objekt unter keinen der bisher genannten Tags, so kann ein beliebiges Objekt definiert werden. Diese Objekte werden durch einzelne Polygone beschrieben, die durch die Angabe einer Höhe einen Volumenkörper darstellen.

Schreibweise                    <others>...</others>

Vorläufer                    <**objects**>

Instanzen                    0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		O1, O2, O3, ...	Identifikationsbezeichnung der beliebigen Objekte

### area

Für ein beliebiges Objekt wird der Polygonfläche eine Farbe sowie eine Höhe zugewiesen. Die Polygonfläche wird in einem Abstand parallel zur x/y-Ebene aufgespannt.

Schreibweise                    <area>...</area>

Vorläufer                    <**others**>

Instanzen                    1

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
zOffset	double	m	]-∞, ∞[	Abstand der Ebene zur Nullebene
height	double	m	[0, ∞[	Identifikationsbezeichnung der beliebigen Objekte
color	string		Alle Farben möglich	Farbe der Fläche

### outerPoint

Zur Bestimmung des Polygons werden einzelne Punkte positioniert, die die Fläche aufspannen.

Schreibweise                    <outerPoint>...</outerPoint>

Vorläufer                    <**area**>

Instanzen                    2...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
id	string		P1, P2, P3, ...	Identifikationsbezeichnung der Eckpunkte eines beliebigen Objektes

### connectingRadius

Damit die einzelnen Punkte eine Fläche ergeben, werden jeweils zwei Punkte miteinander verbunden. Dies erfolgt durch die Angabe eines Radius für einen Kreisbogen. Wird der Wert des Radius gleich Null gesetzt, so wird die Verbindung durch eine Gerade realisiert.

Schreibweise                    <connectingRadius.../>

Vorläufer                      <**area**>

Instanzen                      1...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
fromId	string			Identifikationsbezeichnung des Eckpunktes von dem aus die Verbindung beginnen soll
toId	string			Identifikationsbezeichnung des Eckpunktes in den die Verbindung münden soll
R	double	m	]-∞, ∞[	Radius des Kreisbogens, der zwei Punkte miteinander verbindet. Für R=0 wird eine Gerade verwendet
length	double	m	[0, ∞[	Länge der Verbindungsstrecke

### interfaces

In diesem Tag werden die einzelnen erstellten Segmente zu einem Straßennetz zusammengesetzt. Bisher ist jedes Segment voneinander unabhängig und besitzt sein eigenes Koordinatensystem. Nun wird ein Segment ausgewählt und zu einem globalen Koordinatensystem über einen Differenzwinkel und Versatz angeordnet. Die anderen Segmente werden relativ zu dem ersten bzw. bereits positionierten Segmenten angeordnet.

Schreibweise                    <interfaces>...</interfaces>

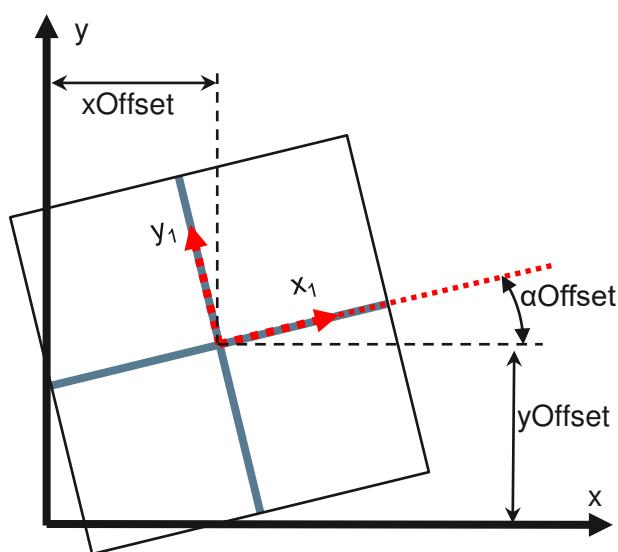
Vorläufer                      <**roadNetwork**>

Instanzen                      1

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
setReferenceSegment	string			Auswahl eines Segmentes, das zu einem Globalen Koordinatensystem positioniert wird
angleOffset	double	rad	$]-\infty, \infty[$	Differenzwinkel zwischen dem globalen Koordinatensystem und dem Koordinatensystem des Segmentes
xOffset	double	m	$]-\infty, \infty[$	Abstand in x-Richtung zwischen dem globalen Koordinatensystem und dem Koordinatensystem des Segmentes
yOffset	double	m	$]-\infty, \infty[$	Abstand in y-Richtung zwischen dem globalen Koordinatensystem und dem Koordinatensystem des Segmentes

### Visualisierung



### **segmentLink**

Dieser Tag setzt ein Segment an ein bereits positioniertes Segment des Straßennetzes.

Schreibweise                    <segmentLink>...</segmentLink>

Vorläufer                      <**interfaces**>

Instanzen                     0...n

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
fromId	string			Identifikationsbezeichnung des bereits positionierten Segmentes, das verbunden werden soll
told	string			Identifikationsbezeichnung des Segmentes, das verbunden werden soll

### **roadLink**

Zur eindeutigen Verknüpfung zweier Segmente wird von jedem Segment jeweils ein Verbindungspunkt einer Straße benötigt. Aufgrund der geometrischen und der tangentialen Übereinstimmung der Straßen im Verbindungspunkt ist das Segment eindeutig positioniert.

Schreibweise                    <roadLink.../>

Vorläufer                      <**segmentLink**>

Instanzen                     1

Attribute

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
fromId	string			Identifikationsbezeichnung des Straßenpunktes des bereits positionierten Segmentes
told	string			Identifikationsbezeichnung des Straßenpunktes des zu verbindenden Segmentes

### **closeRoadNetwork**

Die Funktion closeRoadNetwork ermöglicht das Schließen von Lücken im Straßennetz. Durch die Angabe der zu verbindenden Punkte erfolgt die Erstellung einer Verbindungsstraße automatisiert. Die erstellte Verbindungsstraße besteht aus den geometrischen Elementen der Gerade, des Kreisbogens und der Klothoide.

Schreibweise	<closeRoadNetwork>...</closeRoadNetwork>
Vorläufer	<b>&lt;roadNetwork&gt;</b>
Instanzen	1
Attribute	none

### **connectingPoints**

Als Input der Funktion werden die zu verbindenden Punkte der Segmente angegeben.

Schreibweise	<connectingPoints.../>
Vorläufer	<b>&lt;closeRoadNetwork&gt;</b>
Instanzen	1
Attribute	

Name	Typ	Einheit	Wertebereich	Beschreibung
segmentId1	string			Identifikationsbezeichnung des ersten Segmentes
roadId1	string			Identifikationsbezeichnung des Straßenpunktes des ersten Segmentes, der den Startpunkt der Verbindungsstraße darstellt
segmentId2	string			Identifikationsbezeichnung des zweiten Segmentes
roadId2	string			Identifikationsbezeichnung des Straßenpunktes des zweiten Segmentes, der den Endpunkt der Verbindungsstraße darstellt