

Bericht zum Forschungspraktikum

Johanna Schwöbel

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Betreuung: Julian Amann

Zeitraum: 14. April – 14. Juli 2015

Abgabe:

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	3
2. AKTUELLE METHODEN DER TRASSENMODELLIERUNG.....	3
2.1. <i>Autodesk Civil3D</i>	3
2.2. <i>Autodesk Infraworks</i>	4
3. ZWEI VERWANDTE ANSÄTZE ZUM FREE-SKETCHING APPROACH	5
3.1. <i>Sketch-Based Path Design - James McCrae, Karan Singh</i>	5
3.2. <i>Mathematical formulation and preliminary testing of a spline approximation algorithm for the extraction of road alignments - Laura Garach, Juan de Oña, Miguel Pasadas</i>	7
4. THEORETISCHER ANSATZ	9
5. ANHANG	10
a. <i>Abbildungen</i>	10
b. <i>Tabellen</i>	13
6. QUELLENVERZEICHNIS	14
a. <i>Literaturquellen</i>	14
b. <i>Bildquellen</i>	14

1. Einleitung

Eingebunden in das Projekt „TUM Open Infra Platform“ des Lehrstuhls für Computergestützte Modellierung und Simulation lag das Thema meines Forschungspraktikums in der Trassenmodellierung.

Unter dem Namen TUM Open Infra Platform entwickelt der Lehrstuhl eine Software zur Darstellung von 3D-modellierten Straßenzügen. Als Grundlage dienen drei verschiedene Dateiformate, die von TUM Open Infra unterstützt werden – IFC, LandXML und OKSTRA. Des Weiteren besteht die Möglichkeit Laserscans in Form von Punktwolken zu importieren und darzustellen.

Meine Aufgabe bestand nun zunächst darin, mich anhand der 3D-Modellierungsprogramme Autodesk Civil3D und Autodesk Infraworks in die Trassenmodellierung einzuarbeiten und dabei Testdaten für das TUM-eigene Programm zu erstellen.

Gleichzeitig sollte ich anhand der Developer Documentation die TUM Infra Platform auf einem geeigneten Rechner installieren und mich anschließend auch damit vertraut machen.

Den forschungsfokussierten Teil des Praktikums bildete dann ein theoretischer Ansatz, der die Integrationsmöglichkeit eines Sketched-Based Alignment Tool in das Programm beleuchten sollte.

2. Aktuelle Methoden der Trassenmodellierung

Sowohl Civil3D als auch Infraworks im Portfolio von Autodesk bieten dem Benutzer die Möglichkeit, Straßenzüge als Trassen normgemäß zu modellieren. Jedoch ist die Anwendung aufgrund der schlussendlichen Verwendung verschieden. Civil3D zielt darauf ab, während des Arbeitsprozesses die größtmögliche Parameteranzahl dem Nutzer zu überlassen, um eine variationsreiche Gestaltung im Kontext verschiedener Projektvorgaben zu garantieren. Die Visualisierung der modellierten Straßenzüge ist in Civil3D nicht in großem Maße vorgesehen, sodass Autodesk dem Nutzer mit Infraworks ein Programm zur Verfügung stellt, welches im Zusammenhang des 3D Renderings nochmals eine Möglichkeit der Trassenmodellierung anbietet oder der Vorentwurfsentwicklung dient.

2.1. Autodesk Civil3D

Zur Erstellung einer Trasse auf einem dreidimensionalen Geländemodell in Civil3D benötigt der Nutzer mehrere einzeln zu bearbeitende Elemente, die sich schließlich zu einem 3D-Profilkörper zusammensetzen.

Der Verlauf der Trasse in der-XZ Ebene des dreidimensionalen Raums beruht sich auf die sogenannte Achse, englisch Alignment. Ein Alignment wird als Objekt dargestellt, welches wiederum aus Objekten, beispielsweise Polylinien, oder mit den vorgesehenen Werkzeugen erstellt werden kann. Freihandzeichnen mithilfe der Werkzeuge bezeichnet in Civil3D das Zeichnen von Linien oder Polylinien als Verbindung eines Anfangs- und Endpunktes; bei Bögen und Übergangsbögen gibt es außerdem die Möglichkeit, verschiedene Bogenparameter anzugeben. Dabei kann richtlinienkonform gearbeitet werden, was die Geometrie anhand benutzerdefinierter Parameter einschränkt. Diese bieten die Möglichkeit, unter dem Richtliniendatei-

Editor zum Beispiel den Mindestradius eines Kreisbogens bei einer vorgegebenen Geschwindigkeit fixieren. Die eigentliche Entwurfsüberprüfung in Bezug auf die Längen der Übergangsbögen ist bei Civil3D nicht automatisch garantiert. Der Nutzer muss anhand mehrerer eigenständiger Entwurfsüberprüfungen die Konformität der Klothoiden bestätigen. Die Zusammensetzung der einzelnen Achsenelemente ist dabei uneingeschränkt. Es besteht die Möglichkeit einzelne Festelemente¹, Koppелеlemente² oder Pufferelemente³ einzufügen. Um die Richtlinienkonformität einzuhalten kann eine Gerade jedoch nur von Übergangsbögen gesäumt sein, der direkte Übergang in den Kreisbogen ist aufgrund der Tangentialbedingung unter einer vorgegebenen Geschwindigkeit nicht möglich.

Um den 3D-Profilkörper der Trasse auch in der Y-Höhen-Komponente des Raumes zu definieren, benötigt der Nutzer einen Höhenplan. Soll sich das Alignment terrainsensitiv auf einem Geländemodell befinden, dann kann anhand der Option ‚Längsschnitt‘ die Höhe des Geländes entlang des Achsenverlaufs in den Höhenplan importiert werden. Nun hat der Nutzer die den der Achsenerstellung identischen Arbeitsoptionen zur Erstellung des eigens definierten Höhenplans. Die richtlinienkonforme Arbeitsweise schränkt hier wiederum auf die Verwendung von Linien, Klothoiden und Parabeln ein. Damit kann eine fiktive Höhe gezeichnet und nach eigenem Ermessen die Höhe des Geländes richtlinienkonform approximiert werden. Die entsprechenden Höhenunterschiede werden mit Materialauf- und abtrag ausgeglichen.

Das letzte benötigte Element definiert den Querschnitt der Straße. Dabei stellt Civil3D einen Normvorlagenkatalog zu Verfügung, aus dem der Nutzer seine Querschnittsbestandteile wählen kann. Die Festlegung eines Böschungstyps während dieses Arbeitsschritts beinhaltet gleichzeitig die genaueren Definitionen des Auf- und Abtrags entlang des Straßenzugs. Der Nutzer kann anhand mehrerer Parameter zum Beispiel die Neigung des aufgefüllten oder abgetragenen Materials festlegen.

Erst wenn Achse, Höhenplan und Querschnitt des Straßenzugs vollständig definiert vorliegen, kann mit der Funktion ‚Profilkörper‘ die fertige Trasse modelliert werden.

2.2. Autodesk Infracore

Infracore bietet sich in der aktiven Straßenplanung vor allem als Vorentwurfsoption an. Trassenmodellierung basiert hierbei auf einem im Vergleich zu Civil3D weitgreifend vereinfachten Prinzip, bei dem der Nutzer mit der Funktion ‚Straßenvorentwurf‘ die Möglichkeit hat, eine Achse in Form einer Polylinie zu zeichnen. Zwar können schon in diesem Schritt Bogenformen definiert werden, was jedoch für eine valide Profilkörperbildung nicht vorausgesetzt wird. Die richtlinienkonforme Erstellung der Achse inklusive korrekter Kreisbögen und Klothoiden geschieht, sobald der Nutzer seine lineare diskontinuierliche Polylinie mit der Eingabetaste bestätigt. Gleichzeitig wird der Längsschnitt des Geländes analysiert und die Höhen des Straßenentwurfs angepasst; es ist keine zusätzliche Definition eines Höhenplans notwendig. Anstelle eines Querschnitts kann der Nutzer zwischen mehreren Stilen wählen, um die Gestalt des Profilkörpers zu definieren.

¹ Element, dessen Definition der Geometrie unabhängig anderer Elemente ist

² Element, das tangential zu einem Element - vorangehend oder nachfolgend - sein muss

³ Element, das tangential zu Vorgänger- und Nachfolgeelement sein muss

Kreuzungen werden in Infracore ebenfalls automatisch erstellt sobald die gezeichnete Polylinie einen anderen Straßenzug berührt oder kreuzt. Dabei werden die Parameter der Kreuzung, inklusive Randachsen- und Bogenparameter konform festgelegt, können vom Nutzer dennoch entweder durch die Definition eines Nutzfahrzeugs oder manuell variiert werden.

3. Zwei verwandte Ansätze zum Free-Sketching Approach

Freihandzeichnen von Pfaden auf dreidimensionalen Oberflächen ist im Allgemeinen ein noch sehr unerforschter Bereich der computergestützten Modellierung. Zwar gibt es zahlreiche Ansätze des skizzenbasierten 3D-Modellierens vor allem im Bereich der Game-Industrie sowie auch im architektonischen Bereich mit beispielsweise *Google SketchUp*, die Trassenmodellierung aus dem Tiefbauwesen ist jedoch eher ein weniger publiker Forschungsansatz. Dennoch bestehen mehrere Forschergruppen, die sich im Zusammenhang mit dynamischen Grafiken mit dem Prinzip des skizzenbasierten Straßendesigns beschäftigt haben.

3.1. Sketch-Based Path Design - James McCrae, Karan Singh

In ihrem 2009 veröffentlichten Forschungsbericht präsentieren die beiden Autoren im Kontext der Universität Toronto unter dem Namen *Drive* ein von ihnen entwickeltes Programm zum konzeptionellen Entwerfen von dreidimensionalen Straßennetzwerken. Dabei werden vollständig definierte Straßenmodelle mithilfe von stückweise an den freihandgezeichneten Pfad angepassten Klothoiden erstellt, wobei sowohl die Funktion der Pfadkreuzungen als auch die geländesensitive Arbeitsweise simultan gelöst werden konnten. Zusätzlich zum Ansatz des Path Design wird eine neuartige Anwendung der bekannten Break-Out Ansicht vorgestellt, die das Zeichnen auf der dreidimensionalen Oberfläche erleichtern soll.

Zur Erstellung eines Straßenzuges zeichnet der Nutzer einen Strich in die Ansichtsebene, welcher als zweidimensionale Polylinie repräsentiert wird. Anschließend werden die Punkte der Polylinie in das dreidimensionale Höhenfeld des Terrains projiziert, wobei der Nutzer die Möglichkeit hat, die daraus entstehende dreidimensionale Kurve durch Hinzufügen/Entfernen von Punkten nachzubearbeiten. Die fertige 3D-Polylinie wird in der XZ-Ebene zweidimensional mit Linien, Bögen und Klothoiden angeglichen und darauf zurück in die dreidimensionale Geometrie projiziert, um die vorherigen Geometrien entlang der Höhen anzuwenden.

Zur Annäherung des skizzierten Pfades in der XZ-Ebene erfolgt zunächst die Berechnung der einzelnen Krümmungen an den Eckpunkten der Polylinie mithilfe der Frenet-Serret Formel. Ein dynamischer Programmalgorithmus als Funktion der Bogenlänge passt stückweise eine lineare Approximation an die einzelnen Krümmungen des Strichs an. Der Nutzer definiert im Voraus einen Parameter des Verhältnisses zwischen Approximationsfehler und eingefügter Anzahl an linearen Krümmungen. Jedes Klothoidenelement C_i besitzt Endpunkte (x_i^P, y_i^P) und (x_{i+1}^P, y_{i+1}^P) im Krümmungsraum, die in Kombination mit Klothoidenparameter B sowohl die Krümmung der Klothoidenspirale B als auch die Start- und Endparameterwerte t_1 und t_2 des angepassten Elements definieren.

$$B = \sqrt{\frac{x_{i+1}^P - x_i^P}{\pi(y_{i+1}^P - y_i^P)}}, \quad t_1 = y_i^P B, \quad t_2 = y_{i+1}^P B$$

Somit werden um einer bestimmten geometrischen Vorgabe gerecht zu werden eine oder mehrere Klothoiden eingefügt und anhand der Parameter an die zu approximierende Form angepasst. Um eine C^2 -Kontinuität zwischen zwei Kurven zu gewährleisten, müssen also gemeinsame Endpunkt-, Endtangente- und Endkrümmungsbedingungen erfüllt sein.

Um Kurven zu schließen oder die Möglichkeit zu geben, mithilfe von sogenanntem *Oversketching* den ursprünglichen Verlauf zu überarbeiten, wird ein sogenanntes *joinpiece* eingeführt, ein Klothoidenelement zwischen letztem und erstem Klothoidenelement der ersten Kurve. Es ist von fünf Parametern bestimmt, vom Krümmungswert zwischen letztem Element der vorangegangenen Kurve und *joinpiece*, dem Krümmungswert zwischen *joinpiece* und erstem Element der nachfolgenden Kurve und den Bogenlängen der beiden Anschlusselemente sowie der des *joinpiece* selbst. Diese werden mithilfe des Gradientenverfahrens variiert, um den Approximationsfehler zu minimieren.

$$\|endPoint - startPoint\|_2 + \tau \min_i \left(\left| \int \kappa - 2\pi i \right| \right)$$

Der erste Term repräsentiert dabei die Positionskontinuität zwischen Start- und Endpunkt, der zweite Term die tangentielle Kontinuität. Das Integral über die Krümmung κ entlang einer kontinuierlichen Kurve gibt die Veränderung der Tangentenrichtung wieder. Die Tangenten nähern sich der Kollimation an, wenn das Integral der Krümmung ein Vielfaches von 2π , bei einer einfach geschlossenen Kurve $\pm 2\pi$ ist. τ wird zu Anfang mit 0.0 initialisiert und im Laufe der Iteration auf 5.0 erhöht sodass die Kurve zuerst die Endpunkte verbindet und schließlich die Verbindung zur C^2 -Kontinuität glättet.

Die Indikation von Pfadkreuzung geschieht durch das Zeichnen entweder einer kleinen Unterbrechung in einem der gezeichneten Pfade, was in einer Überquerung resultiert oder von zwei durchgezogenen Pfaden, woraus eine Kreuzung berechnet wird. Für kompliziertere Kreuzungen steht ein Algorithmus zur Höhenoptimierung im Kontext des Terrains und den gezeichneten Pfaden zur Verfügung.

Der zu Ende resultierende Profilkörper ist mit einem weispurigen Straßenquerschnitt standardisiert, kann vom Nutzer jedoch zu anderen benutzerdefinierten Querschnitten variiert werden. Der Auf- und Abtrag von Gelände geschieht automatisiert, genauso wie die Modellierung von Tunneln oder Brücken.

Bezeichnend für den Ansatz von James McCrae und Karan Singh ist außerdem die Verwendung eines Lasso-Menüs und der BreakOut-Linse. Um den Aufwand an Ansichtsnavigation zu minimieren, ist es möglich in der aktuellen Ansicht einzelne Bereiche auszuwählen und diese in einer Unteransicht unabhängig in drei verschiedenen Modi⁴ (siehe Abbildung 1) nicht nur zu betrachten, sondern auch zu bearbeiten (siehe Abbildung 2).

⁴ Birdseye, Mid-way und Close-up

3.2. Mathematical formulation and preliminary testing of a spline approximation algorithm for the extraction of road alignments - Laura Garach, Juan de Oña, Miguel Pasadas

Der zweite verwandte Ansatz basiert auf einer anderen Motivation als der des vorherigen. Um die automatische Erfassung von Alignments in infrastrukturellen Datensets wie zum Beispiel GPS-Daten möglich zu machen, wird ein Algorithmus präsentiert, der Staßenzüge als Punktfolgen erkennt und diese mithilfe von kubischen Splines approximiert. Dabei wird zunächst die raumbezogene Datenerfassung genutzt, um den Spline an die geografisch kodierten Punktgruppen der Straße anzupassen. Dieser Spline kann anschließend zur Erschließung der geraden, kreisbogenförmigen und klothoidischen Straßensegmente genutzt werden. Nach Definition eines Splines kann auch hier der Approximationsfehler mithilfe von zusätzlicher Knotenpunkteingliederung soweit minimiert werden, dass er konstant bleibt. Dabei gilt: Ist der Graph von Grad n , sollten üblicherweise $n-1$ Kontinuitätsbedingungen erfüllt sein, um die Ebenmäßigkeit der Approximation zu gewährleisten.

Auf der Suche nach der passenden Funktion werden aus einem Set $S_3(\Delta_m)$ an kubischen Splinefunktionen diejenigen von Grad kleiner gleich drei betrachtet, welche C^2 -Kontinuität besitzen.

Die allgemeine Form der gesuchten Funktion setzt sich aus der B-Spline Basis des Sets $\{B_0^3, \dots, B_{m+2}^3\}$ und der Punktgruppe der Straße in UTM Koordinaten $\{a_0, \dots, a_n\} \subset [a, b]$ und $\{P_0, \dots, P_n\} \subset \mathbb{R}^2$ zusammen.

Genauer wird eine Funktion s gesucht, sodass gilt:

- $s: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ mit $s(a_i) = P_i, i = 0, \dots, n$
- $s(t) = (s_1(t), s_2(t))$ mit $s_i(t) \in S_3(\Delta_m), i = 1, 2$.

Nunmehr ist $s(t) = \sum_{i=0}^{m+2} \alpha_i B_i^3(t)$, wobei $\alpha_0, \dots, \alpha_{m+2} \in \mathbb{R}^2$ die Unbekannten des jeweiligen Problemumstandes sind, die als Lösung des Minimierungsproblems erlangt werden können.

Es muss also eine Funktion $s \in (S_3(\Delta_m))^2$ gefunden, sodass:

$$J(s) \leq J(v), \forall v \in (S_3(\Delta_m))^2$$

wobei $J(v) = \sum_{i=0}^n \langle v(a_i) - P_i \rangle^2 + \varepsilon \int_a^b \langle v''(t) \rangle^2 dt$ mit $\varepsilon \in (0, +\infty)$, dem sogenannten smoothness parameter.

Um die Funktion eindeutig zu definieren, müssen jedoch sowohl das Intervall als auch die Anzahl der Teilintervalle und die der Approximationspunkte n mit deren dazugehörigen Parameter $a_i = \frac{\sum_{j=1}^i \langle P_j - P_{j-1} \rangle}{\sum_{j=1}^n \langle P_j - P_{j-1} \rangle} \in [0, 1], i = 0, \dots, n$ sowie der smoothness parameter ε im Voraus festgelegt werden.

Die Funktion des Bogenparameters kann dann als Funktion $l: [0, 1] \rightarrow [0, L]$ konstruiert werden, definiert durch

$$l(r) = \int_0^r \langle s'(t) \rangle dt, l \in [0, 1]$$

wobei $L = \int_0^1 \langle s'(t) \rangle dt$. Die Funktion $l(r)$ ist steigend, also existiert eine Umkehrfunktion $t: [0, L] \rightarrow [0, 1]$, sodass $t(l(r)) = r, \forall r \in [0, 1]$. Somit kann der kubische Spline-Funktion als $s: [0, L] \rightarrow \mathbb{R}^2$ mit

$$s(d) = s(t(d)), d \in [0, L]$$

verstanden werden, wobei $s(t)$ und $s(d)$ dasselbe beschreiben. Als nächstes wird die Krümmungsfunktion $k(d), d \in [0, 1]$ betrachtet, mit

$$k(d) = \left\langle \frac{ds}{dd} \right\rangle = \frac{\langle s'(t(d)) \times s''(t(d)) \rangle}{\langle s'(t(d)) \rangle^3}, d \in [0, L].$$

Im Krümmungsdiagramm (Krümmung über Distanzfunktion d) wird ein Toleranzband mit konstanter Breite $\pm 1/R$ eingeführt, innerhalb dem alle Krümmungen als null definiert werden (siehe Abbildung 3). R ist dabei abhängig vom Typ der Straße.

Nach Einführung des Toleranzbandes kann die überarbeitete Krümmungsfunktion als

$$k^*(d) = \begin{cases} k(d), & \text{wenn } |k(d)| > k_0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

definiert werden, wobei $k_0 = 1/R_0$.

Um nun die von Null verschiedenen Bereiche des Krümmungsdiagramms anzunähern, werden Trapeze an diese Bereiche zwischen zwei aufeinanderfolgende Nullpunkte eingepasst. Dabei ist die obere Kante des Trapezes ein Kreisbogen mit konstanter Krümmung, die Seiten des Trapezes, in denen die Krümmung von null bis zur Krümmung des Kreisbogens variiert bilden die Übergangsklothoiden.

Als einschränkende Bedingung dient, dass die Fläche des eingepassten Trapezes der des anzunähernden Bereiches gleichen muss. Daraufhin werden die Eckpunkte des ermittelten Krümmungspolygons, welche die Trasse in ihre einzelnen Elemente unterteilt, im UTM Koordinaten mitsamt den Krümmungswerten und dem zugeordneten Alignment festgehalten (siehe Abbildung 4).

Durch die Annäherung der Kurve mithilfe der Trapeze entsteht ein Fehler, der die Länge der geraden Anteile erhöht, während die Länge der Klothoiden verringert wird. Diese verfälschten Längen können jedoch mithilfe R_0 korrigiert werden, sodass auch im Falle einer S-Kurve eine fälschlich ermittelte Gerade zwischen den zwei Kurvenelementen wieder zu null gesetzt wird. Zum Abschluss wird die Kurve anhand der korrigierten Längen neu berechnet.

4. Theoretischer Ansatz

Zur Charakterisierung eines Sketched Based Alignment Tools in TUM OpenInfra, ist vor allem der Zweck des Tools entscheidend. Am ehesten sinnvoll wäre die Benutzung zur Demonstration spontaner Straßenentwürfe, bei der die detailreiche Planung des Straßenzuges nicht vordergründig wichtig ist. Aus Zeitgründen habe ich mich darauf beschränkt, das Problem nur in 2D in Bezug auf den Lageplan zu betrachten. Der nächste Forschungsschritt wäre, die Approximation in 3D zu projizieren.

Um nun einen Straßenverlauf als Lageplan einer Trasse zu zeichnen, muss die zeitabhängige Position der Maus möglichst optimal genutzt werden. Die Abtastung des Programms der Geschwindigkeit der Mausbewegung anzupassen, stellt ein Problem dar, bei dem es zur Anhäufung von abgetasteten Positionen an den Stellen mit langsamer Mausbewegung kommen kann. Zur Vermeidung solcher Anhäufungen sieht mein Ansatz vor, die Mausbewegung direkt in Form von Linien zu speichern. So wird die aktuelle Mausposition P_i gleichzeitig als Endpunkt der Verbindungslinie zur vorangegangenen Position P_{i-1} und als Startpunkt der Linie zu nachfolgenden Position P_{i+1} definiert. Als zusätzliche Einschränkung wird eine minimale Länge h der einzelnen Linien festgelegt, die Positionsanhäufungen ausdünnert. Überflüssige Positionspunkte, die diese Bedingung nicht erfüllen, werden so gar nicht erst eingefügt.

Aus der Mausbewegung entsteht also eine Polylinie, wie sie den meisten Ansätzen des Free Sketching zugrunde liegt. Die Modifizierung dieser Polylinie geschieht anschließend mithilfe der Scheitelklothoide und deren Erweiterung zu einer speziellen Bogenfolge⁵, die beide schon als Funktion in der Plattform verfügbar sind. Die Auswahl zwischen den Optionen entscheidet sich durch den Schnittwinkel der beiden anschließenden Liniensegmente. Eine Scheitelklothoide darf nach RAL⁶ und RAA⁷ nur bei sehr flachen Schnittwinkeln $\gamma < 10gon$ verwendet werden, da sie im Scheitelpunkt einen verhältnismäßig großen Krümmungssprung besitzt. In allen anderen Fällen wird die Erweiterung verwendet.

An einem zu modifizierenden Eckpunkt einer Polylinie werden durch die beiden Liniensegmente die Richtungen der beiden Anfangstangenten und somit auch der Schnittwinkel γ bereits gegeben. Durch Vorgaben nach RAL und RAA sind die beiden Klothoidenparameter A_1 und A_2 der Entwurfsklasse gemäß zu wählen (siehe Tabellen 1 und 2).

Alle anderen Parameter für die vollständige Definition der Abrundung ergeben sich daraufhin durch Berechnungen.⁸ (Für ein vollständiges Parameterset eines Alignment in TUM OpenInfra siehe Abbildung 5)

Zur Erstellung des kompletten Alignments wird über die Eckpunkte der gesamten Polylinie iteriert, ausgenommen des Start- und Endpunktes. Somit ist die Umwandlung der Polylinie in ein Alignment ein Prozess, in dem der Nutzer ausschließlich die Entwurfsklasse seines Straßenzuges und die Mausbewegung über die Landschaftsoberfläche (siehe Abbildung 6) selbst initiieren muss.

⁵ Gerade - Klothoide A_1 - Kreisbogen R - Klothoide A_2 - Gerade

⁶ Richtlinien für die Anlage von Landstraßen

⁷ Richtlinien für die Anlage von Autobahnen

⁸ genauere Ausführung in Quelle 4

5. Anhang

a. Abbildungen

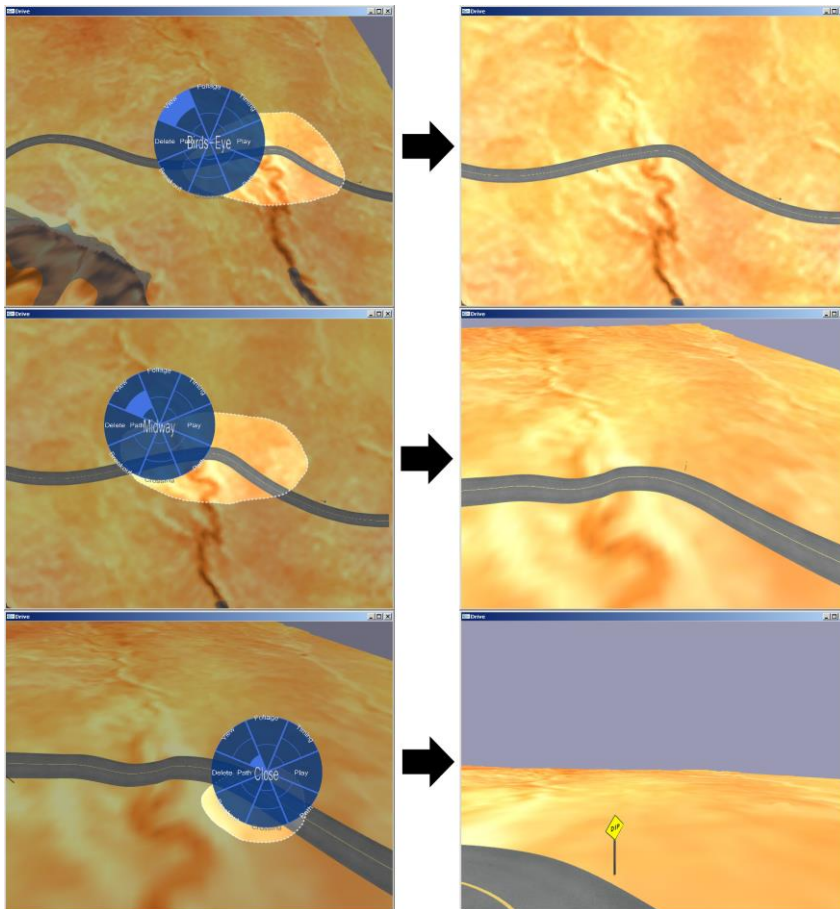


Abbildung 1: Drei Modi der BreakOut-Ansicht, Birds-Eye(oben),Midway(Mitte) und CloseUp(unten)

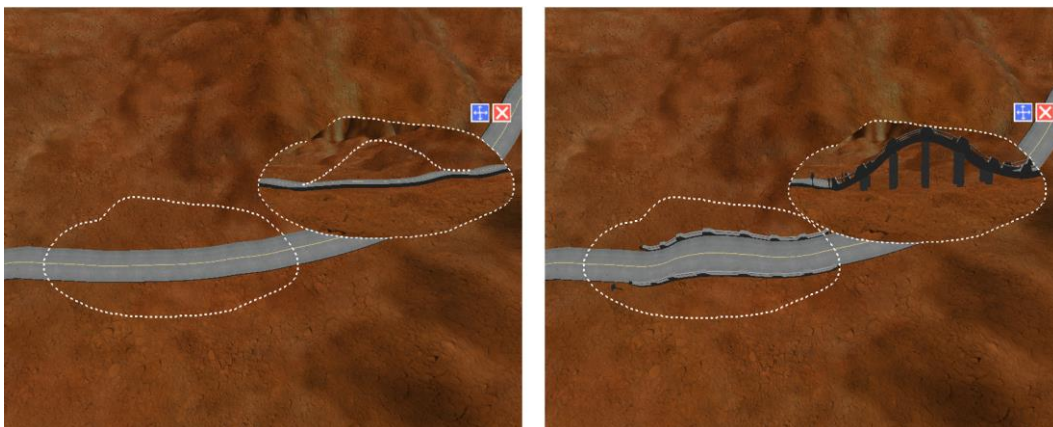


Abbildung 2: BreakOut-Ansicht eines ausgewählten Bereichs

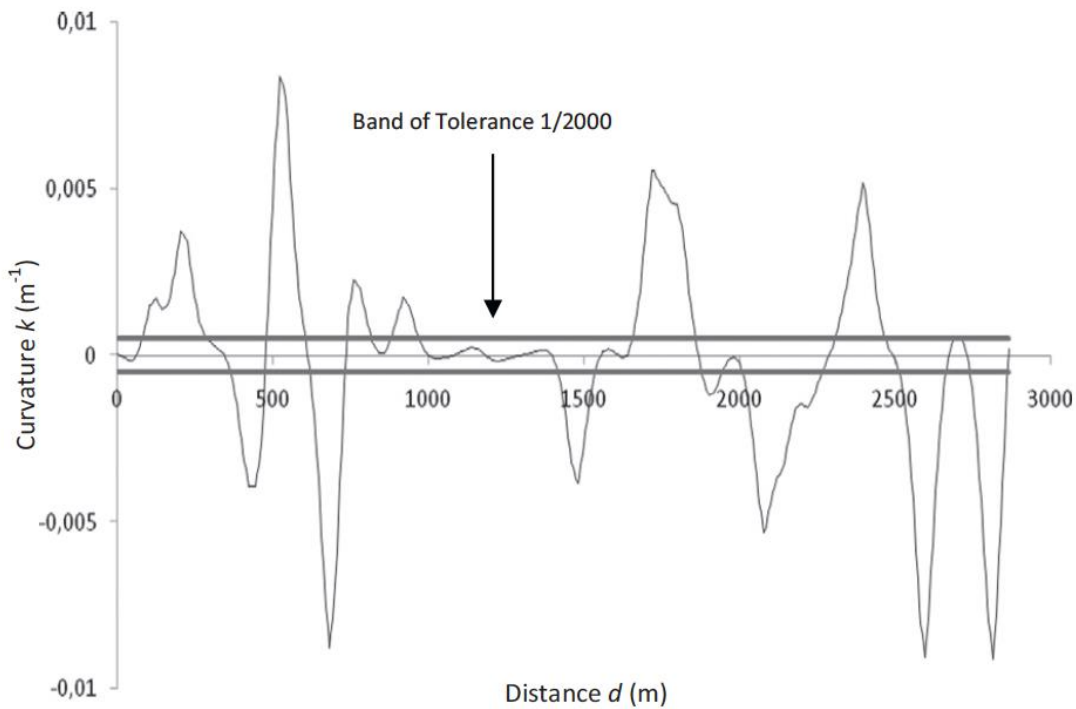


Abbildung 3: Krümmungsdiagramm mit Toleranzband

UTM X	UTM Y	Distance	Curvature	Alignment
444998.4543	4148678.251	0	0	Straight
445073.8819	4148674.499	74.9879925	0	Clothoid
445125.3209	4148673.512	126.1075303	0.002274778	Curve
445251.2191	4148693.512	253.6505995	0.002274778	Clothoid
445290.1482	4148707.192	294.5919624	0	Straight
445356.3906	4148731.81	364.671598	0	Clothoid
445390.7206	4148743.3	400.6561106	-0.003816543	Curve
445427.7482	4148751.307	438.4944427	-0.003816543	Clothoid
445468.5007	4148754.807	479.2922693	0	Clothoid
445507.0547	4148761.046	518.9072725	0.007862313	Curve
445524.2847	4148767.685	537.7910773	0.007862313	Clothoid
445582.8884	4148806.629	607.8398094	0	Straight
445591.0936	4148812.775	617.9329431	0	Clothoid

Abbildung 4: Koordinaten der signifikanten Punkte mit Krümmung und zugehörigem Kurvenelement

Abbildung 5: Mausbewegung in Tum OpenInfra, repräsentiert als Punktfolge

HcAlignment Data										Spiral Calculations										Element End Calculations			
Element Start Chainage	Type	Easting	Northing	East	Radius	IsCcw	Spiral A	IsEntry	Length	Full Spiral Length	Spiral Origin Direction	Spiral Origin Projection	Spiral Origin Offset	Spiral Origin Easting	Spiral Origin Northing	Endpoint Projection	Endpoint Offset	End Radius	Turned Angle	End Direction	End Easting	End Northing	
100	STRAIGHT	7436.5625	63196.7688	-2.61000673	0	FALSCH	0	0	42.1216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1542.1518	CLOTHOID	7446.3706	63199.4274	-2.61000673	0	FALSCH	301.1888917	WAHR	27.488	27.488	-2.61000673	0	0	7446.3706	63199.4274	27.45887428	-0.027624177	480	0	-2.61000673	7446.3706	63199.4274	
1589.5158	ARC	7448.7298	63194.5577	-2.61001673	4000	FALSCH	0	0	801.2011	0	0	0	0	7448.7298	63194.5577	27.45887428	-0.027624177	480	0	-2.61001673	7448.7298	63194.5577	
1930.7119	STRAIGHT	7396.7471	63194.8681	-2.60429673	0	FALSCH	0	0	4.2829	0	0	0	0	7396.7471	63194.8681	0	0	0	0	0	0	0	0
1930.9602	ARC	7396.2033	63195.7909	-2.60429673	4000	FALSCH	0	0	846.3621	0	0	0	0	7396.2033	63195.7909	0	0	0	0	0	0	0	0
2785.3543	STRAIGHT	7298.3442	63137.3478	-2.60888673	0	FALSCH	0	0	124.2187	0	0	0	0	7298.3442	63137.3478	0	0	0	0	0	0	0	0
2829.573	CLOTHOID	72735.5736	63138.4488	-2.60888673	0	WAHR	303.6240942	WAHR	61	61	-2.60888673	0	0	72735.5736	63138.4488	60.39894974	0.302915942	2000	0	-2.60888673	72735.5736	63138.4488	
2915.573	ARC	72675.3331	63134.8882	-2.67397673	2000	WAHR	0	0	890.1824	0	0	0	0	72675.3331	63134.8882	0	0	0	0	0	0	0	0
3860.7334	CLOTHOID	71856.8629	63107.2639	-2.53743673	2000	WAHR	303.6240942	FALSCH	61	61	-2.53743673	80.98884974	-0.302915942	71856.7971	63082.361	7.10543E-15	-4.79118E-49	0	0	-2.53743673	71856.7971	63082.361	
3921.7334	STRAIGHT	71896.7967	63092.2611	-2.52486673	0	FALSCH	0	0	69.8488	0	0	0	0	71896.7967	63092.2611	0	0	0	0	0	0	0	0
4017.4233	ARC	71728.7278	63067.2402	-2.52486673	4000	FALSCH	0	0	1920.2889	0	0	0	0	71728.7278	63067.2402	0	0	0	0	0	0	0	0
5057.6862	ARC	7036.56	63032.9191	-2.61937673	7000	FALSCH	0	0	188.2099	0	0	0	0	7036.56	63032.9191	0	0	0	0	0	0	0	0
5663.6991	CLOTHOID	70209.2892	63024.0212	-2.60069673	0	WAHR	300.3885730	WAHR	56	56	-2.60069673	0	0	70209.2892	63024.0212	55.8889026	0.221973009	2200	0	-2.60069673	70209.2892	63024.0212	
5749.6991	ARC	70184.984	63020.4302	-2.60782673	2000	WAHR	0	0	457.7880	0	0	0	0	70184.984	63020.4302	0	0	0	0	0	0	0	0
6207.4674	CLOTHOID	69726.8026	63020.4487	-2.67967673	2000	WAHR	300.3885730	FALSCH	56	56	-2.67967673	55.9889026	-0.221973009	69726.8026	63045.0762	7.10543E-15	-4.82296E-49	0	0	-2.67967673	69726.8026	63045.0762	
6263.4674	STRAIGHT	69676.8961	63045.0762	-2.68714873	0	FALSCH	0	0	88.2628	0	0	0	0	69676.8961	63045.0762	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 6: Parameterset eines Alignments in TUM OpenInfra

b. Tabellen

Entwurfs- klasse	Entwurfs-/Betriebsmerkmale					Führung auf der Strecke				Führung im Knotenpunkt
	Planungs- geschwindigkeit [km/h]	Betriebsform	Querschnitt	gesicherte Überhol- abschnitte pro Richtung	Führung des Radverkehrs	Linienführung	empfohlener Radien- bereich R [m]	Höchstlängs- neigung max s [%]	empfohlener Kuppen- halbmesser H _k [m]	Regellösung auf der übergeordneten Straße ^{*)}
EKL 1	110	Kraftfahrstraße	RQ 15,5	~ 40 %	straßen- unabhängig	sehr gestreckt	≥ 500	4,5	≥ 8.000	Ein-/Ausfädeln
EKL 2	100	allg. Verkehr	RQ 11,5+	≥ 20 %	straßen- unabhängig oder fahrbahn- begleitend	gestreckt	400 – 900	5,5	≥ 6.000	Ein-/Abbiegen/Kreuzen mit Lichtsignalanlage
EKL 3	90	allg. Verkehr	RQ 11	keine	fahrbahn- begleitend oder auf der Fahrbahn	angepasst	300 – 600	6,5	≥ 5.000	Ein-/Abbiegen/Kreuzen mit/ohne Lichtsignalanlage
EKL 4	70	allg. Verkehr	RQ 9	keine	auf der Fahrbahn	sehr angepasst	200 – 400	8,0	≥ 3.000	Ein-/Abbiegen/Kreuzen ohne Lichtsignalanlage

^{*)} Weitere Einsatzmöglichkeiten der Knotenpunktarten in Abhängigkeit von den Entwurfsklassen sind in Abschnitt 6.3.3 dargestellt.

Tabelle 1: Parametervorgaben gemäß RAL

Straßenkategorie	AS 0 / AS I		AS II			Entwurfsklasse	min A [m]
	außerhalb oder innerhalb		außerhalb oder innerhalb	außerhalb	innerhalb		
Lage zu bebau- ten Gebieten						EKA 1 A	300
Straßenwidmung	BAB	nicht BAB	BAB	nicht BAB	alle	EKA 1 B	240
Bezeichnung	Fernautobahn	Autobahnähn- liche Straße	Überregional- autobahn	Autobahnähn- liche Straße	Stadtautobahn	EKA 2	160
Entwurfsklasse	EKA 1 A	EKA 2	EKA 1 B	EKA 2	EKA 3	EKA 3	90

Tabelle 2: Parametervorgaben gemäß RAA

6. Quellenverzeichnis

a. Literaturquellen

1. GARACH, LAURA / DE OÑA, JUAN / PASADAS, MIGUEL (2008): *Mathematical formulation and preliminary testing of a spline approximation algorithm for the extraction of road alignments*. In: ELSEVIER: *Automation in Construction 47, An International Research Journal*, 1-9.
2. MCCRAE, JAMES / SINGH, KARAN (2008): *Sketching Piecewise Clothoid Curves*. In: ALVARADO, C. / CANI, M.-P.: EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling 2008
3. MCCRAE, JAMES/SINGH, KARAN (2009): *Sketched-Based Path Design*. In: Canadian Information Processing Society Toronto: *Proceedings of Graphics Interface 2009*, Toronto, 95-102.
4. BÄUMKER, M.: *Rechenverfahren der Ingenieurvermessung - 5. Semester*. Fachhochschule Bochum, Fachbereich Vermessungswesen und Geoinformatik

b. Bildquellen

- Abbildung 1 und Abbildung 2, Quelle: MCCRAE, JAMES/SINGH, KARAN (2009): *Sketched-Based Path Design*. In: Canadian Information Processing Society Toronto: *Proceedings of Graphics Interface 2009*, Toronto, 95-102.
- Abbildung 3 und Abbildung 4, Quelle: GARACH, LAURA / DE OÑA, JUAN / PASADAS, MIGUEL (2008): *Mathematical formulation and preliminary testing of a spline approximation algorithm for the extraction of road alignments*. In: ELSEVIER: *Automation in Construction 47, An International Research Journal*, 1-9.
- Tabelle 1, Quelle: FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) (2013): *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL)*
- Tabelle 2, Quelle: : FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) (2008): : *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen(RAA)*