

Automatisierte Verfahren zur Quelldatenaufbereitung und Szenengenerierung für die Flugsimulation

Frank Bildstein

Rheinmetall Defence Electronics GmbH, Bremen
Simulation und Ausbildung

Abstract. Am Beispiel realisierter Hubschraubersimulator-Projekte wird aufgezeigt, inwieweit sich echtzeitfähige 3D-Simulationsszenarien mittels regelbasierter Verfahren weitgehend automatisiert generieren lassen. Die Regeln bilden dazu die Bedeckungs-informationen des nachzubildenden realen Geländes auf einen Pool von synthetischen 3D-Modellen und Texturen ab, um aus diesen Elementen das Übungsgelände zusammenzusetzen. Es wird dargestellt, wie mit Hilfe parametrisierbarer Regeln sowohl systemspezifische Vorgaben als auch geländespezifische Besonderheiten berücksichtigt werden können.



1 Aufbau und Komponenten eines Hubschraubersimulators

Die Fa. Rheinmetall Defence Electronics entwickelt kundenspezifische Trainingssysteme wie Flugzeugsimulatoren (für Starr- und Drehflügler), maritime Simulatoren (für Über- und Unterwasserfahrzeuge), militärische Simulatoren (Schieß- und Gefechtssimulatoren) und zur Fahrausbildung (LKW, Einsatzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge).

Die folgende Abbildung zeigt den typischen Aufbau eines Flugsimulators: Kernstück ist der Dome, in dem sich eine – zumeist originalgetreue - Nachbildung der Pilotenkanzel und der Fluginstrumente befindet. Die Innenflächen des Domes werden gleichzeitig als Projektionsflächen

genutzt. Der Dome ist auf ein Bewegungssystem montiert, welches während des Flugtrainings die auf den Piloten einwirkenden Kräfte simuliert. Die im mittleren Bild gezeigte Treppe ist lediglich ein Hilfsmittel, um die Kabine zu erreichen. Wird der Simulator aktiviert, wird diese Treppe eingefahren. Im Kopf des Domes befinden sich die Projektoren, die das virtuelle Szenario auf den Projektionsflächen darstellen. Spezielle Algorithmen sorgen dafür, daß die Bilder der einzelnen Projektoren unverzerrt auf der gekrümmten Projektionsfläche dargestellt werden und nahtlos aneinanderpassen.

Der Simulationsrechner initialisiert zunächst alle Komponenten und steuert während der Simulation alle beteiligten Subsysteme wie das Bewegungssystem, das Akustiksystem und die Bildgeneratoren. Die Bildgeneratoren berechnen anhand der Vorgaben des Simulationsrechners die aktuelle Sicht des Piloten auf das Übungsgelände und übertragen die gerechneten Bilddaten an die Projektionssysteme. Das Sichtsystem bezieht dazu alle erforderlichen Geometrie- und Texturdaten des statischen Geländes und der dynamischen Modelle aus der Sicht-Datenbasis. Für eine ruckfreie Darstellung rechnen die Bildgeneratoren konstant 60 Bilder pro Sekunde.

An einem separaten Ausbilderplatz kann der Ausbilder die Flugübungen vorbereiten und abspeichern; außerdem wird hier das Flugtraining verfolgt und der Ausbilder kann jederzeit in die Simulation eingreifen, beispielsweise um Wetter-, Zeit- und andere Simulationsparameter zu beeinflussen.

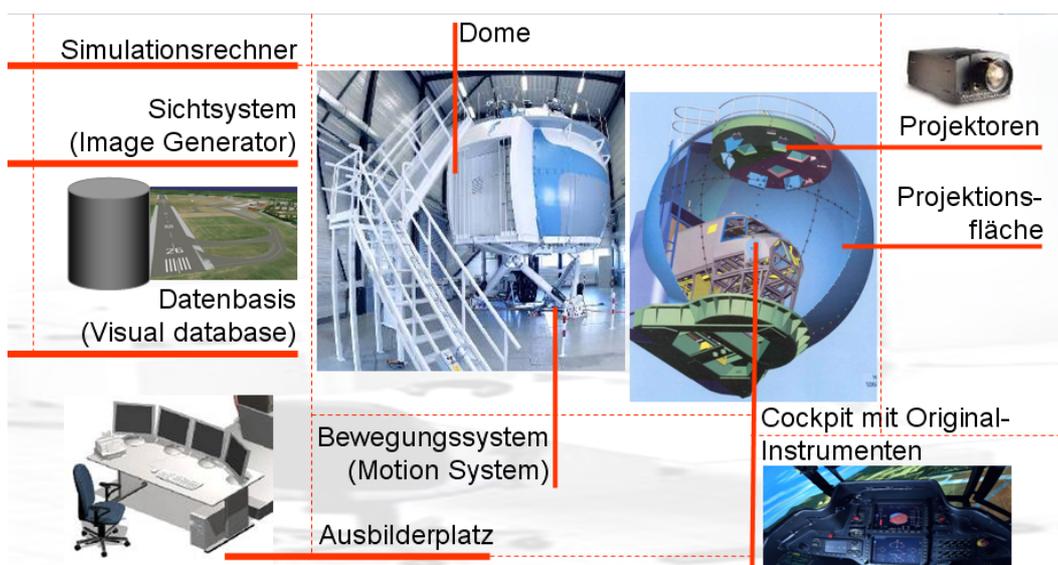


Bild 1: Typische Komponenten eines Flugsimulators

Die Sichtdatenbasis enthält zum einen die 3D-Geometrie und Texturen des Grundgeländes (3D-Höhenrelief), die zur Möblierung des Geländes erforderlichen statischen Objekte sowie die dynamischen Modelle und Effekte, die während der Simulation vom Simulationsrechner aktiviert werden. Eine wichtige Komponente der Datenbasis sind die nicht-visuellen Informationen, die der Simulationsrechner benötigt, um beispielsweise Kollisionen zu berechnen, schaltbare Objekte wie Runway-Befeuerungen korrekt zu schalten. Diese Simulator-Steuerdaten müssen mit den visuellen Bestandteilen der Datenbasis korrelieren.

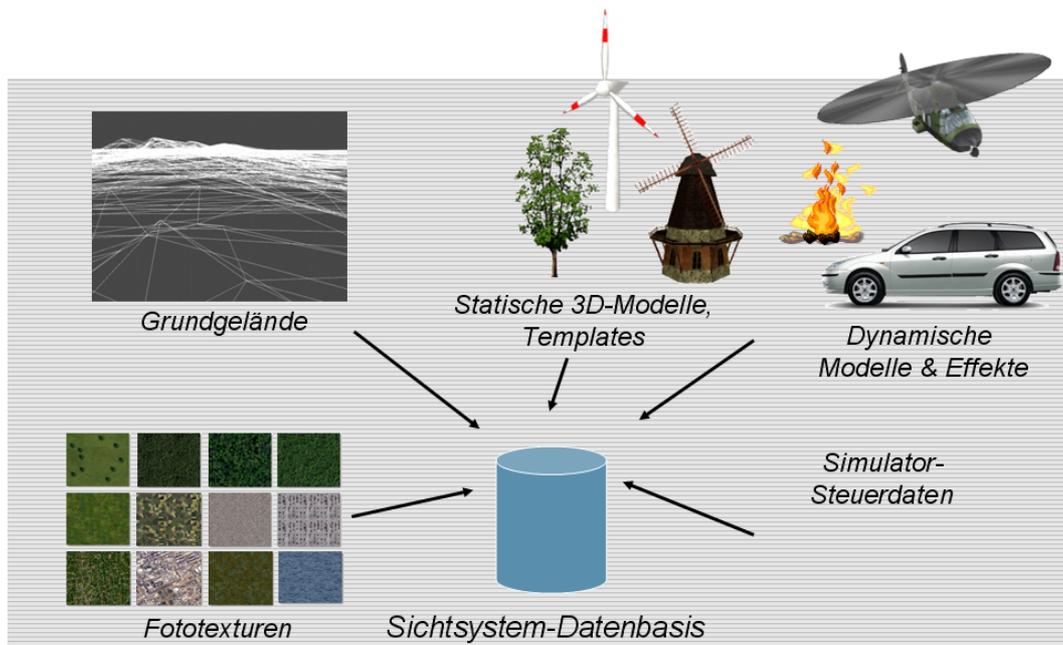


Bild 2: Komponenten einer Sichtsystem-Datenbasis

Für ein Helikopter-Trainingszentrum wurde ein Übungsgebiet von 500 x 500 km Ausdehnung realisiert. Der überwiegende Teil dieses Gebietes erstreckt sich über Nord- und Mittel-deutschland; zusätzlich sind auch Teile von drei angrenzenden Nachbarstaaten enthalten.

Als Ausgangsmaterial wurde ein digitales Geländemodell in Form eines regelmäßigen Gitters mit einer Rasterweite von 30 m verwendet. Außerdem wurden von einem kommerziellen Anbieter vektorieLL ausgeprägte Bedeckungsdaten beschafft. Spezielle Aufmerksamkeit galt hierbei insbesondere auch trainingsrelevanten Bedeckungsdaten zu Strommasten, -leitungen, Flughindernissen und Windkraftanlagen.



Bild 3: Lage und Ausdehnung des realisierten Übungsgebietes

2 Modellier-Workflow

Der Modellier-Workflow sieht prinzipiell vor, daß das Übungsgelände unter Berücksichtigung der realitätsgetreuen Bedeckungsdaten aus vorgefertigten, synthetischen Geländekacheln neu zusammengesetzt wird. Hierzu müssen in einem ersten Schritt die Bedeckungsdaten aufbereitet und gefiltert werden, so daß nur noch die simulations- und sichtrelevanten Objekte enthalten sind. Für die verbleibenden Objekte wird dann mit Hilfe von Zuordnungsregeln definiert, durch welche synthetischen Texturen bzw. Modellobjekte sie in der Datenbasis repräsentiert werden sollen.

Die folgende Abbildung zeigt links einen Geländeausschnitt mit typischen Bedeckungsdaten in vektorieller Darstellung. Sie setzen sich aus Linienfeatures (wie z. B. Straßen, Schienen), Flächenfeatures (wie z. B. Wälder, Seen) und Punktfeatures (wie z. B. Windkraftanlagen, Masten, markante Gebäude) zusammen. Für jede dieser Kategorien gibt es eine Reihe von Zuordnungsregeln, die auf entsprechende 3D-Repräsentationen verweisen. Beispielsweise wird eine Landstraße auf ein entsprechend gestaltetes, aneinanderreihbares Straßenstück inklusive Markierungen, Begleitflächen und 3D-Leitpfosten abgebildet. Für eine Reihe von Straßenkategorien, Gewässertypen, Vegetationsobjekte und städtische/dörfliche Strukturen werden dazu entsprechende Templates modelliert und in einer Bibliothek abgelegt.

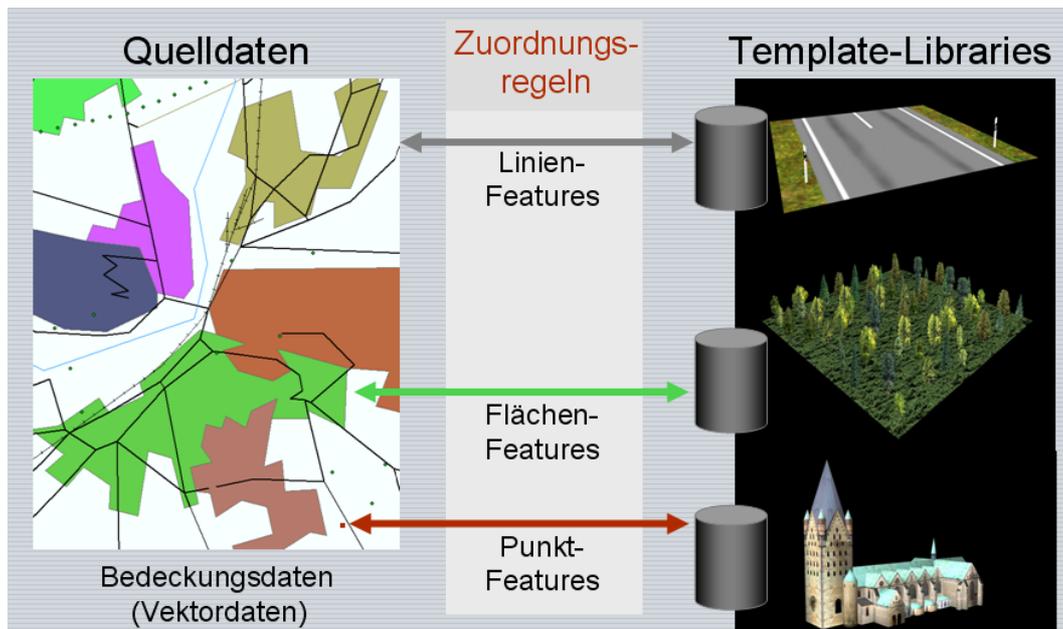


Bild 4: Realisierungskonzept – Georepräsentative Darstellung realer Gelände mittels Template-Libraries

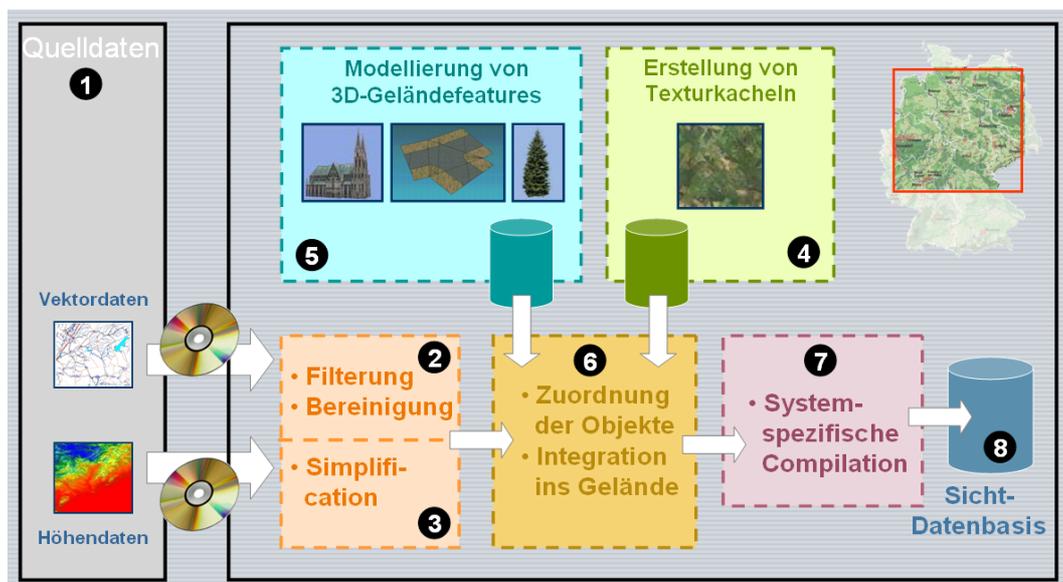


Bild 5: Datenbasis-Generierworkflow

Der oben skizzierte Workflow wird im folgenden präzisiert: er beginnt mit der Beschaffung und Aufbereitung geeigneter Quelldaten. Die beschafften Höhen- und Vektordaten (1) werden in einer

ersten Phase aufbereitet (②). Als erstes werden die Quelldaten zugeschnitten, d. h. an die Ausdehnung des Übungsgebietes angepaßt. Nicht relevante Objekte werden im nächsten Schritt anhand von Ausschlußregeln herausgefiltert und aus dem Datensatz entfernt.

Als nächstes werden die verbliebenen Quelldaten auf typische Fehler überprüft, z. B. werden identische, übereinander liegende Punkte zu einem Punkt zusammengefaßt, offene Flächenfeatures geschlossen, Kreuzungspunkte von linearen Features überprüft und gegebenenfalls explizit ausgeprägt sowie kleine Lücken mit Hilfe von Fangradien geschlossen.

Parallel dazu wird eine erste Filterung des Datensatzes nach einheitlichen globalen Kriterien vorgenommen. In späteren Phasen wird diese Filterung nochmals durch Anwendung lokaler, regionsabhängiger Kriterien verfeinert. Bei der globalen Filterung wird beispielsweise die niedrigste Straßenkatagorie aus dem kommerziellen Quelldatensatz komplett entfernt. Auch werden Flüsse erst ab einer gewissen Mindestbreite berücksichtigt und beim Schienennetz werden alle Abstellgleise aus den Daten gelöscht.

Ergebnis dieser Phase ist ein korrigierter Quelldatensatz, der bereits unter Berücksichtigung der spezifischen Belange der Helikopter-Flugausbildung global vereinfacht wurde.

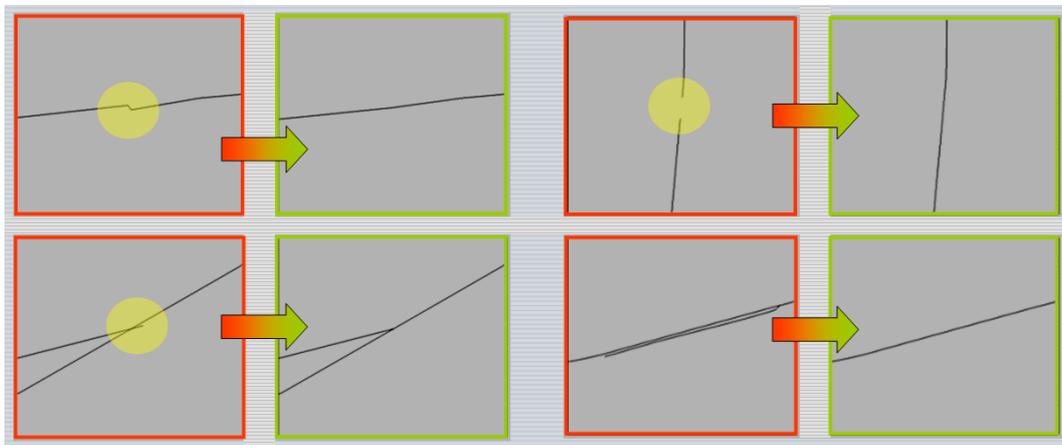


Bild 6: Regelbasierte Bereinigung und globale Filterung des Datensatzes

In der dritten Phase (③) findet die eigentliche Optimierung des Datensatzes statt. Ziel dieser Phase ist es, die Komplexität der Szene auf der einen Seite so einzugrenzen, daß sie auf dem Sichtsystem performant, d. h. mit 60 Hz Generierrate dargestellt werden kann. Andererseits soll die Szene trotz der Vereinfachungen möglichst geringe Abweichungen von der Realität aufweisen; insbesondere sollen trainingsrelevante Merkmale weitgehend erhalten bleiben. Zu berücksichtigen ist dabei stets, daß das Flugtraining bezüglich der Darstellung des Geländes und der Möblierungsobjekte bestimmte Sichtweiten verlangt.

Deshalb wird ausgehend von der Leistungsfähigkeit des Systems und den vorgegebenen Sichtweiten berechnet, wie viele geometrische Objekte sich durchschnittlich in der Szene befinden dürfen, wie komplex diese sein dürfen und welche Objekte vorrangig zu berücksichtigten sind. Diese Werte kann man anfangs nur grob schätzen; tatsächlich geht man so vor, daß man den Szeneninhalte iterativ anpaßt und mittels Performance-Messungen verifiziert, wo weitere Reduktionen erforderlich sind bzw. wo eine höhere Detaillierung möglich ist.

Anhand der geschätzten Vorgaben werden entsprechende Regeln zur Vereinfachung des Datensatzes erstellt, z. B. zur Ausdünnung von Stützpunkten der linearen und arealen Objekte, wobei der Verlauf bzw. die Kontur bestmöglichst gewahrt bleiben:

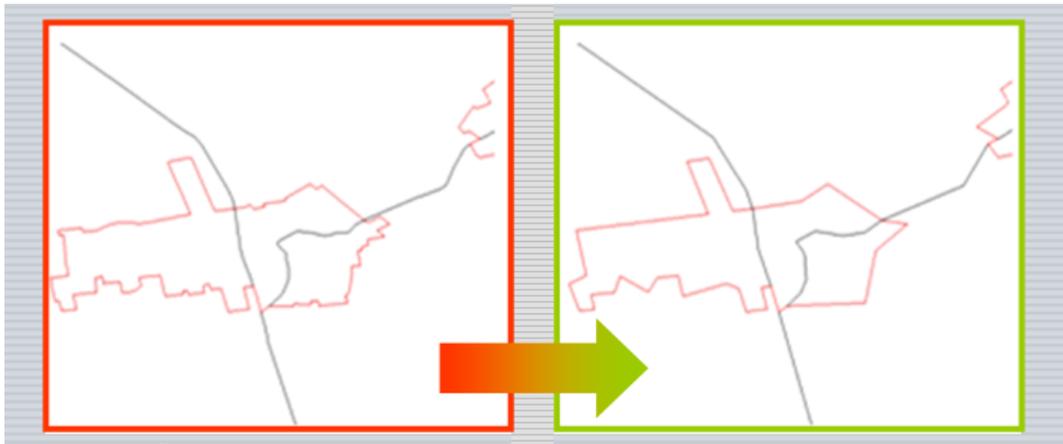


Bild 7: Generalisierung durch Ausdünnen von Stützpunkten an linearen Features und Flächenfeatures

Diese Generalisierung wird für alle linearen und arealen Objekte durchgeführt. Straßen, die in den Vektordaten zum Teil durch zwei Vektoren (ein Vektor je Fahrtrichtung) repräsentiert sind, werden im Rahmen der Generalisierung auf einen Vektor reduziert. Das folgende Bild zeigt einen Geländeausschnitt nach der Generalisierung; wesentliche Elemente und markante Verläufe blieben erhalten:

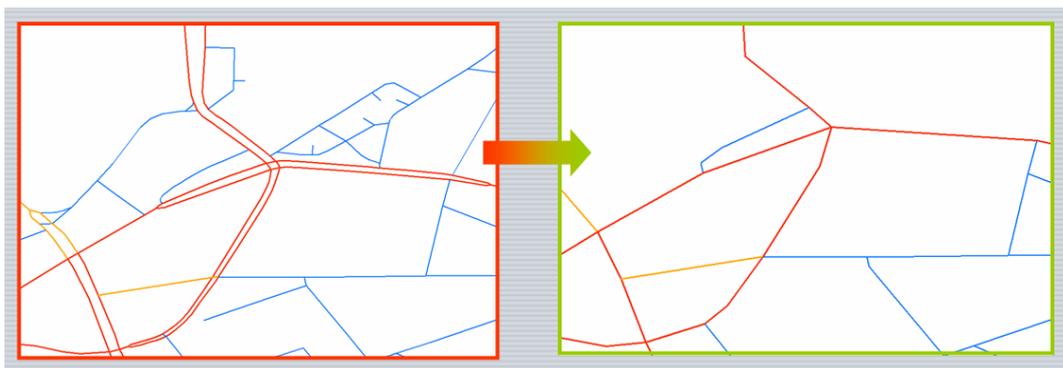


Bild 8: Generalisierung durch Ausdünnen von Stützpunkten an linearen Features und Flächenfeatures

Bei der Realisierung des 500 x 500 km großen Übungsgebietes wurde festgestellt, daß die einzelnen Regionen z. T. sehr unterschiedliche Charaktere aufweisen: Je flacher eine Region beispielsweise ist, desto weniger Geometrie reicht für das Grundgelände; Ballungsräume und Großstädte zum Beispiel weisen komplexe Straßennetzwerke auf. Insofern sieht der Modellierworkflow vor, das Regelwerk zur Vereinfachung der Datensätze an die jeweiligen regionalen Besonderheiten anzupassen. Hierzu kann der Modellierer die Regeln entsprechend parametrisieren und diese Parameter iterativ tunen, bis die angestrebte Reduktion der Komplexität erreicht ist und dennoch eine möglichst realitätsgetreue Darstellung gewahrt bleibt.

Parallel zur Quelldatenaufbereitung wird modellierseitig ein entsprechender Pool an Geländetexturen (④) und 3D-Templates (⑤) aufgebaut. Die Geländetexturen und 3D-Features müssen für alle relevanten Oberflächenstrukturen erstellt werden, d. h. für alle Geländemerkmale, die nach der Filterung übriggeblieben sind, werden entsprechende Repräsentationen benötigt. Die Erstellung der Texturen erfolgt mit klassischen Bildbearbeitungstools. Das Hauptaugenmerk bei der Texturierung liegt darauf, die charakteristischen Farb- und Struktureigenschaften der Oberflächen wiederzugeben, damit der Pilot die Oberflächen anhand des Sichteindrucks identifizieren kann. Die Anreicherung der Templates mit 3D-Objekten steigert den Wiedererkennungswert und hilft dem

Trainee, seine Geschwindigkeit und seine Flughöhe besser einzuschätzen. Die Erstellung der 3D-Objekte erfolgt mit kommerziell verfügbaren 3D-Modelliertools.

Die nachfolgende Abbildung zeigt Texturkacheln für unterschiedliche Bedeckungen wie Ackerflächen, Laub-, Wald- und Mischwälder, asphaltierte Flächen, Parkplätze, dörfliche und städtische Strukturen, Moor und Wasserflächen. Diese Kacheln sind in vertikaler und horizontaler Richtung aneinanderreihbar. Teilweise werden diese Kacheln durch entsprechende dreidimensionale Objekte angereichert, um ihnen ein realistischeres Aussehen zu geben. Außerdem braucht der Pilot diese Höhenstrukturen, um seine Flughöhe einzuschätzen.

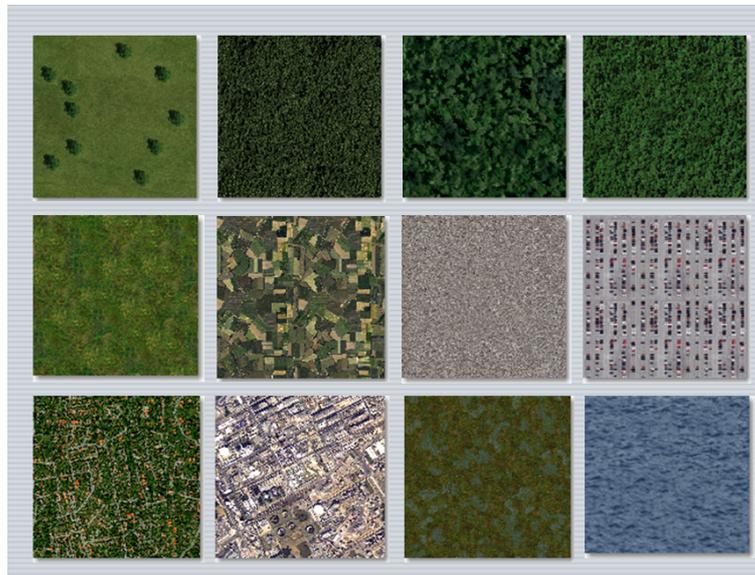


Bild 9: Template-Katalog für Flächenobjekte (Auszug)

Nach dem gleichen Prinzip werden auch Templates für die linearen Elemente erstellt. Hier sind die Templates jeweils in einer Richtung aneinanderreihbar. Für das zu realisierende Übungsgebiet wurden 13 verschiedene Typen von linearen Objekten festgelegt:

Lineare Elemente

A	Fluss I	(4m)
B	Fluss II	(20m)
C	Fluss III	(50m)
D	Fluss IV	(100m)
E	Kanal	(20m)
F	Autobahn	
G	Bundesstrasse	
H	Landesstrasse	
I	Landstrasse	
K	Strasse in Ortschaft	
L	Feldweg	
M	Eisenbahn, elektr.	
N	Eisenbahn	

Bild 10: Festlegung der linearen Objekte (links) mit Beispielen (rechts)

Eines der wesentlichen Arbeitspakete beim Modellieren der 3D-Geländefeatures war die Erstellung von Kreuzungs- und Brückentemplates. Hierzu wurde zunächst festgelegt, für welche paarweisen Kombinationen der insgesamt 13 Fluß-, Straßen- und Schientypen entsprechende Templates benötigt werden. Jede realisierte Kreuzung wurde in drei Ausprägungen (Einmündung, Gabelung und Kreuzung) realisiert. Insgesamt wurden 43 Kreuzungstypen in jeweils drei Varianten sowie zusätzlich 53 Brückenmodelle erstellt:

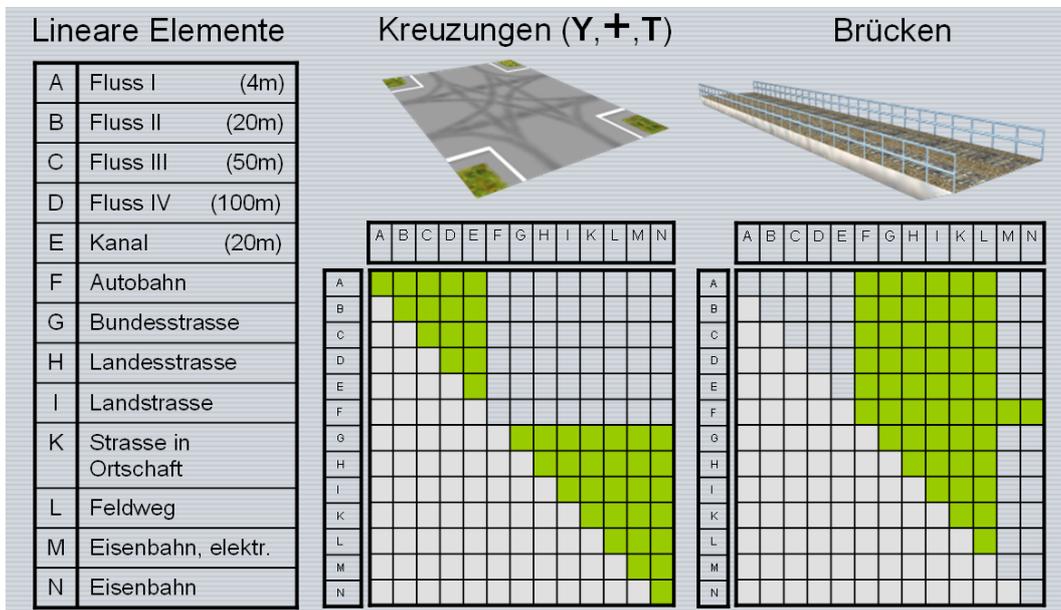


Bild 11: Übersicht über die realisierten Kreuzungs- und Brückentemplates

Die nächste Grafik zeigt eine Auswahl der realisierten Kreuzungstemplates in einer 2D-Draufsicht:

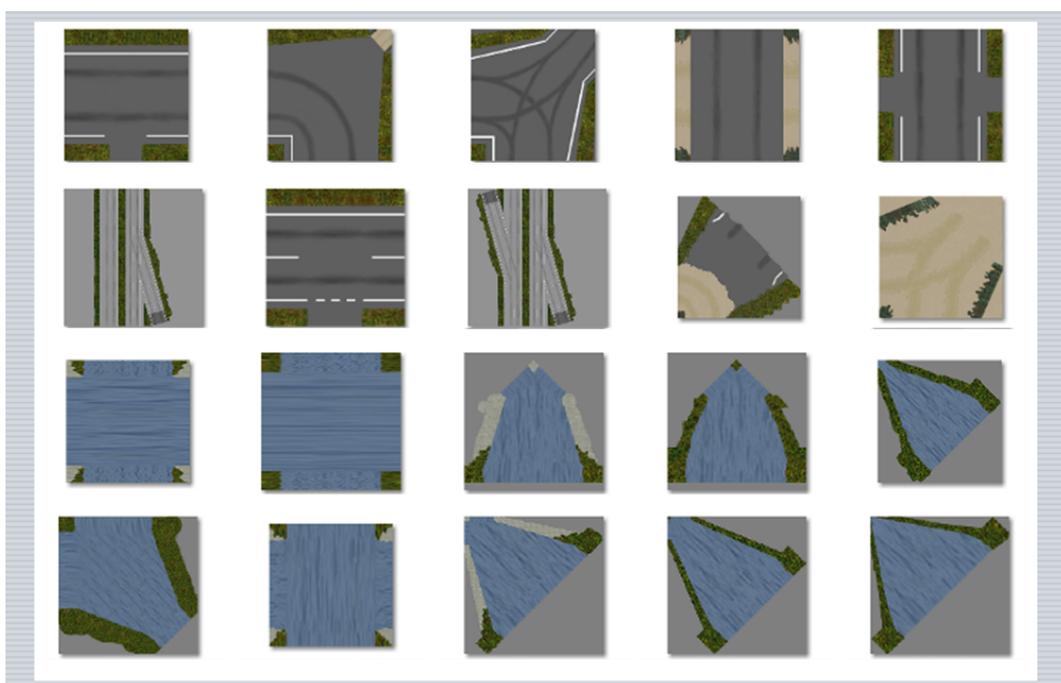


Bild 12: Kreuzungstemplates (Auszug)

Nach der aufwendigen Vorverarbeitung der Vektordaten und der Modellierung der Geländetemplates folgt im nächsten Schritt (6) die Zuordnung der Templates zu den Vektordaten. Hierzu müssen die Vektordaten entsprechend angepaßt werden: beispielsweise im Bereich von sich kreuzenden linearen Features müssen abhängig vom zugeordneten Brücken- bzw. Kreuzungstemplate modellspezifische Anpassungen an den Vektordaten vorgenommen werden. Die

Templates selbst werden hingegen nicht angepaßt: sowohl die Abmessungen als auch die Anschlußpunkte für die betroffenen Vektoren werden von ihnen vorgegeben.

Das nachfolgende Bild erläutert dies am Beispiel einer einzufügenden Brücke für einen Schienenkörper über einen Fluß. Anhand der Vektordaten wird das entsprechende Brückentemplate zugewiesen. Die Vektordaten weisen keinen gemeinsamen Kreuzungspunkt für diese beiden Features auf; dieser Kreuzungspunkt wird folglich berechnet und in die Vektoren integriert (①). Anschließend werden die betroffenen Vektoren gesplittet und so angepaßt, daß sie sauber an die vorgegebenen Anschlußpunkte des Templates anstoßen. Gegebenenfalls wird der weitere Verlauf des Vektors angepaßt, wenn zu große Knicke an den Anschlußpunkten entstehen. Im Bereich des eingefügten Templates werden alle Stützpunkte eliminiert (③).

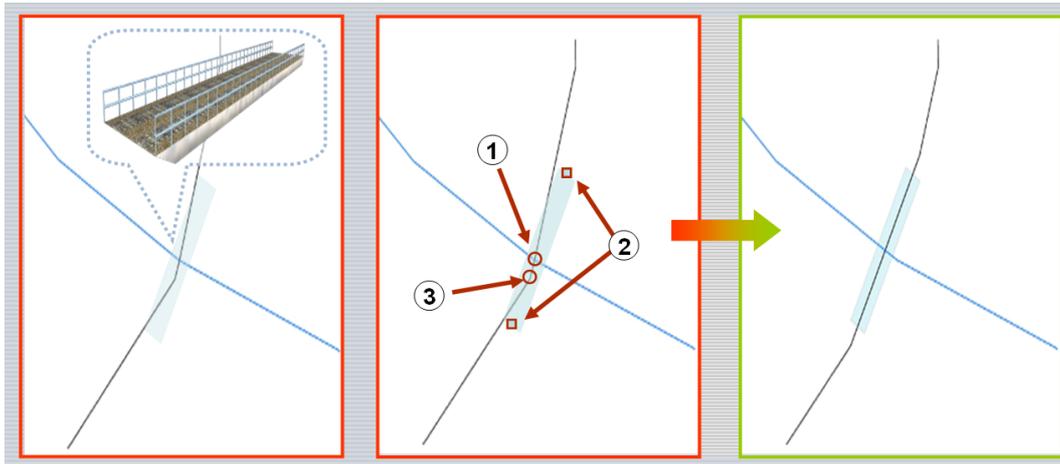


Bild 13: Regelbasierte Anpassung der Vektordaten zur Integration eines Brückentemplates

Noch aufwendiger gestaltet sich die Vektordatenaufbereitung bei Autobahnkreuzen und –abfahrten, da hier die Vektordaten sehr komplex sind: zum einen wird die Autobahn selber durch zwei Vektoren (einer je Fahrtrichtung) beschrieben, zum anderen sind auch alle Verbindungsbahnen an Abfahrten und BAB-Kreuzen in den Vektordaten enthalten. Mit Hilfe eines komplizierten Regelwerks werden diese Konstrukte in den Vektordaten sukzessive vereinfacht, bis letztendlich nur noch zwei Vektoren mit einem Kreuzungspunkt übrigbleiben. Anschließend wird das entsprechende Template wie zuvor beschrieben in die Vektordaten integriert.

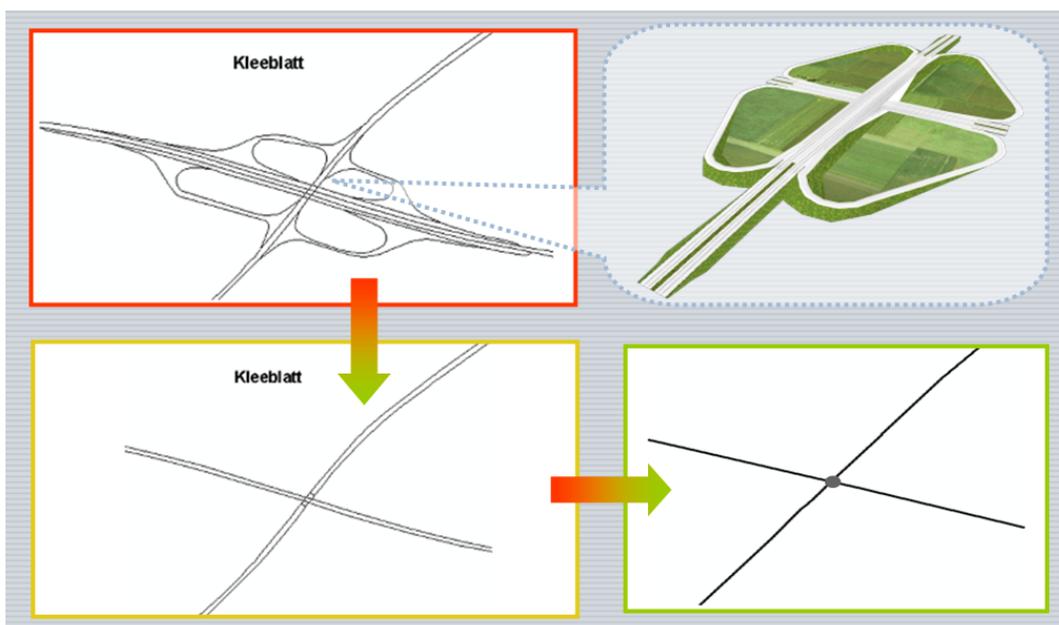


Bild 14: Regelbasierte Anpassung der Vektordaten zur Integration eines Autobahnkreuzes

Da Wälder im Kontext des Helikopter-Flugtrainings eine sehr wichtige Rolle spielen, gab es trainingspezifische Anforderungen an die Repräsentation von Waldbereichen: zum einen sollten an den Wäldrändern zusätzlich aufgelockerte Baumreihen platziert werden, um die Waldkanten aufzulockern. Für Straßen und Wege, die durch Waldgebiete verlaufen bzw. unmittelbar an Waldgebiete angrenzen, sollte ein Korridor mit einer bestimmten Breite realisiert werden.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, mußten die Vektordaten entsprechend aufbereitet werden. Die Waldflächen wurden entsprechend der darin verlaufenden Schneisen neu segmentiert, dabei wurden die vorgegebenen Korridorbreiten berücksichtigt. An den äußeren Rändern der Wälder wurden Säume als zusätzliche Flächenelemente definiert, um dort im nächsten Schritt aufgelockerte Einzelbäume zur Auflockerung einbringen zu können.

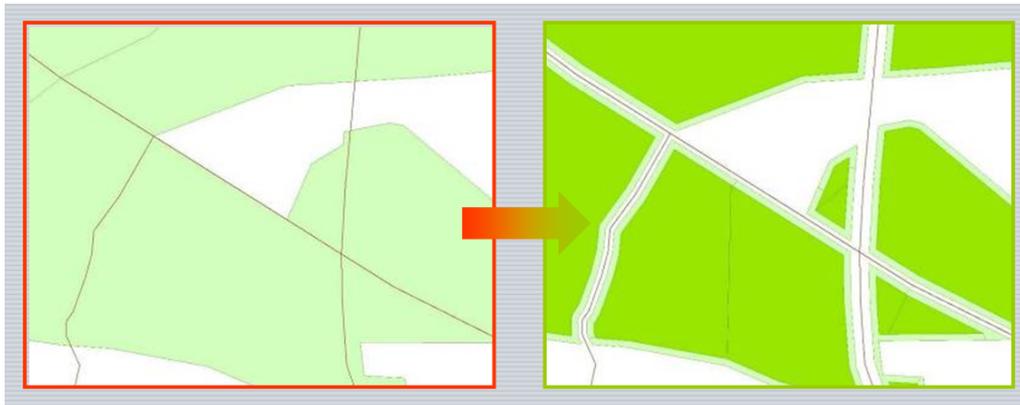


Bild 15: Regelbasierte Ausgestaltung von Wäldern mit Schneisen

3 Realisierung und Ergebnisse

Als Werkzeug für die Definition und Anwendung der regelbasierten Datenaufbereitung wurde die Feature Manipulation Engine (FME) der Fa. Safe eingesetzt, die es erlaubt, entsprechende Regelwerke zunächst in einem graphischen Editor zu definieren und dann anschließend auf beliebige Datensätze wiederholt anzuwenden. Hierbei kann der Verarbeitungsprozeß an jeder beliebigen Stelle angehalten werden, um sich die Zwischenergebnisse in einem Viewer anzusehen. In den Verarbeitungsprozeß wurden an mehreren Stellen parametrisierbare Stellschrauben eingebracht, um damit den Grad der Vereinfachung situationsgerecht anpassen zu können. Die FME-Software stellt darüber hinaus eine Vielzahl von GIS-Funktionen und logischen Operatoren zur Verfügung, die für einen solchen Workflow erforderlich sind.

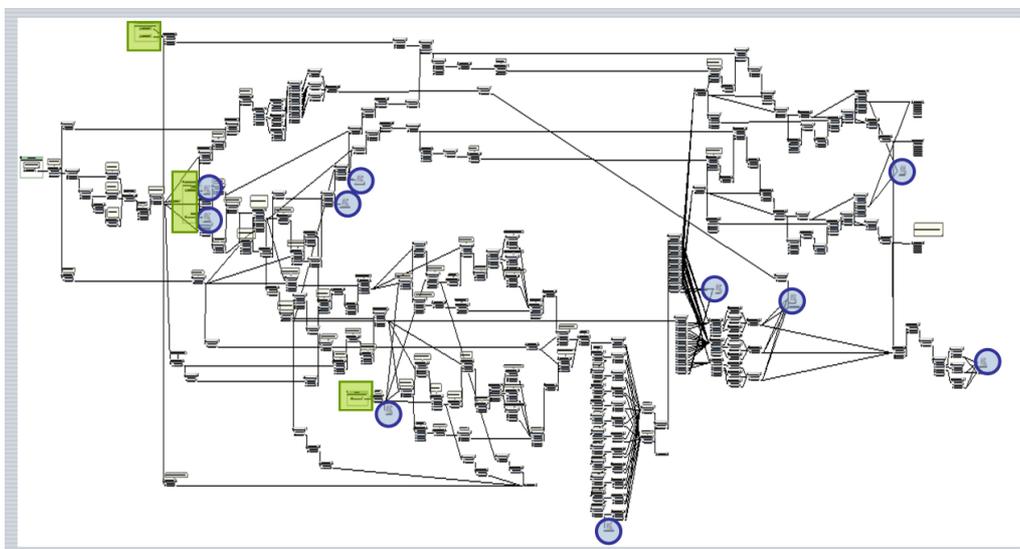


Bild 16: Graphische Darstellung des FME-Workflow zur Quelldatenbearbeitung für Brücken

Das Bild oben zeigt exemplarisch einen FME-Workflow zur Aufbereitung der Quelldaten in den Bereichen, wo Brücken eingefügt werden. Die grün hinterlegten Bereiche kennzeichnen Stellen, an denen der Modellierer Parameter einstellen kann, um den Workflow an spezielle Besonderheiten anzupassen. Blau hinterlegt sind die Stellen, an denen der Workflow unterbrochen wird, um dem Modellierer im Viewer das Endergebnis bzw. die Resultate von Zwischenschritten anzuzeigen. Die Visualisierung der Zwischenergebnisse dient der Verifikation schwieriger Verarbeitungsschritte bzw. der Inspektion „unerwarteter“ Verarbeitungszustände.

Die beiden nächsten Abbildungen demonstrieren beispielhaft Ergebnisse des Workflows: sie zeigen jeweils den Vektordatensatz sowohl im Ursprungszustand (links) als auch das Resultat nach Abschluß aller Korrekturen, Filterungen und system-spezifischer Aufbereitungen (rechts). Die folgende Abbildung zeigt einen vollständigen Ausschnitt; die Ausdünnung ist im direkten Vergleich deutlich erkennbar. Wichtig ist jedoch, daß die wesentlichen Konturen der Wälder, urbanen Regionen und Gewässer erhalten blieben und trotz Ausdünnung der Straßennetzes alle Straßen erreichbar bleiben und Verbindungsstraßen zwischen Ortschaften nicht gelöscht wurden.

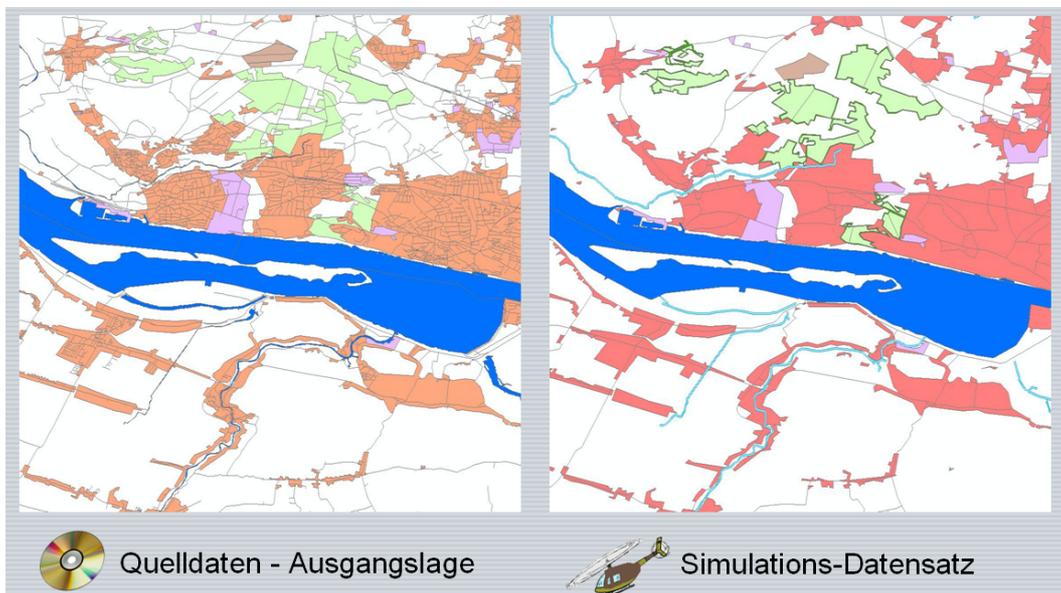


Bild 17: Gegenüberstellung Quelldaten – Simulationsdaten, allgemein

Die nächste Abbildung zeigt als Auszug nur das Straßennetz in einem Ballungsgebiet. Die niedrigste (links grün dargestellte) Straßenkategorie wurde hier komplett entfernt. Die höheren Kategorien wurden regelbasiert ausgedünnt und generalisiert. Hervorgehoben sind exemplarisch einige Autobahnkreuze und –abfahrten, die in den Quelldaten vollständig repräsentiert sind und im Simulationsdatensatz nur noch aus einem Schnitt- und Referenzpunkt für das entsprechende 3D-Modell bestehen.

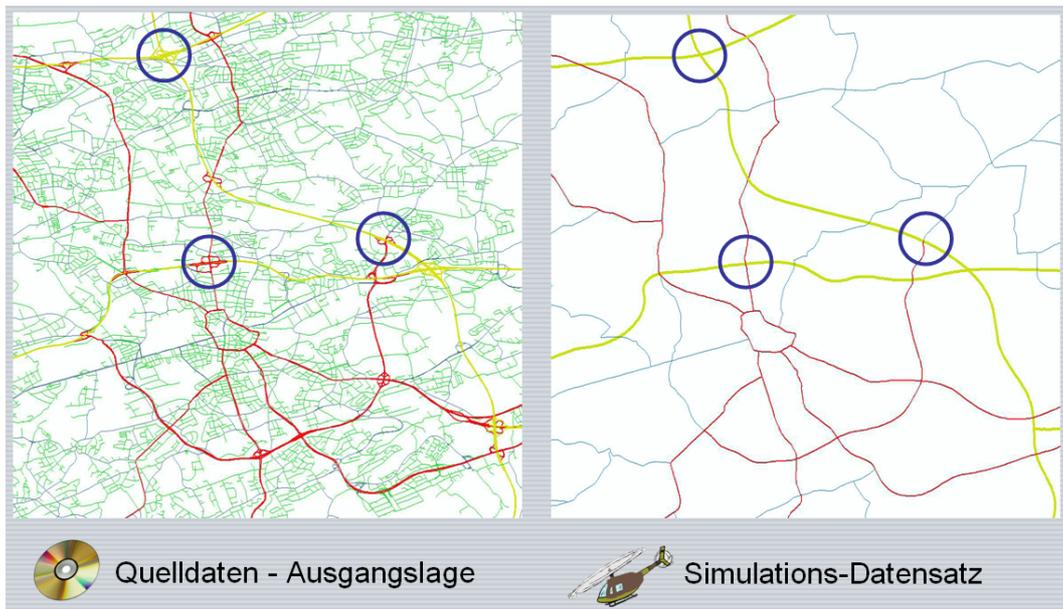


Bild 18: Gegenüberstellung Quelldaten – Simulationsdaten, hier: Straßennetzwerk

Nach den Template-Zuweisungen erfolgt die Übersetzung (⑦) des aus den Modell- und Textur-Templates zusammengesetzten Übungsgebietes in die eigentliche Sichtdatenbasis (⑧). Diese wird gleichzeitig optimiert für die Echtzeit-Visualisierung des Geländes auf dem Sichtsystem.

Wie das generierte Übungsgebiet letztendlich auf dem Sichtsystem dargestellt wird, zeigt der nachfolgende Screenshot. Gut zu erkennen sind hier die Säume entlang der Waldkanten mit aufgelockerten Baumreihen, außerdem das Template für die Ortschaft, welches an die tatsächlichen Grenzen der Ortschaft angepaßt wurde und als Kombination aus Luftbild und ausgewählten 3D-Gebäuden ausgeprägt ist. Die vorne im Bild laufende Straße überlagert als Linienelement die darunterliegende Texturkachel des Dorf-Untergrundes.



Bild 19: Screenshot der Simulator-Datenbasis

4 Fazit

Die realitätsgetreue Nachbildung eines 3D-Geländes anhand von Vektordaten und einer Bibliothek synthetischer Texturen und Modelltemplates konnte in diesem Hubschraubersimulator-Vorhaben erfolgreich durchgeführt werden. Aufgrund der recht unterschiedlichen Geländecharaktere und diverser regionaler und lokaler Besonderheiten konnte keine einheitliche, globale Vorgehensweise zur Filterung und Aufbereitung der Vektordaten angewendet werden. Vielmehr erfordert der Workflow ein flexibles, parametrisierbares Regelwerk, welches der Modellierer auf die einzelnen Geländekacheln anwenden und iterativ so verfeinern kann, daß einerseits die Sichtsystemperformance optimal ausgenutzt wird und andererseits der optische Eindruck bestmöglich gewahrt bleibt. Mit Hilfe der regelbasierten Verarbeitungsschritte läßt sich der Modellierprozeß weitgehend automatisieren. Die Bewertung der Geländeeigenschaften, um daraus eine geeignete Initialisierung des parametrisierten Regelwerks abzuleiten sowie die iterative Feinjustierung dieser Parameter durch Sichtkontrollen und Performance-Messungen am Zielsystem machen jedoch den geschulten Modellierer in diesem Workflow unabdingbar.

