

2 Stand der Technik

Systeme, die die Generierung von Waldmodellen für VR-System aus Fernerkundungsdaten beschreiben, sind bisher nicht in der Literatur beschrieben. Es finden sich jedoch zahlreiche Veröffentlichungen, die Teilbereiche des hier erforderlichen Ansatzes beschreiben.

Diese Teilbereiche sollen in diesem Kapitel beleuchtet werden. Der sicherlich zentrale Aspekt ist dabei die Erkennung von Einzelbäumen in Fernerkundungsdaten. Allerdings sind auch die Extraktion und Verarbeitung von Geländedaten, die Herleitung von abgrenzenden Geometrien, die Generierung von Baumartenkarten, sowie die Analyse, welche forstlichen Daten aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können, im Umfeld einer automatischen Waldgenerierung von Interesse.

2.1 Einzelbaumerkennung

Im Bereich der Einzelbaumerkennung sind in der Literatur zahlreiche Verfahren zu finden, die auf verschiedenen Ansätzen basieren. Insbesondere im forstlichen Bereich sind hier Veröffentlichungen zu finden. Die meisten davon stammen von Forschergruppen aus den walddreichen Ländern Skandinaviens sowie aus Kanada.

Nachdem bereits Ende der 1970er Jahre von Solodukhin in ersten Untersuchungen die Eignung flugzeuggetragener Laserscanner zur Ableitung forstlicher Parameter eines Bestandes beziehungsweise einer Baumgruppe betrachtet wurden [Solodukhin et. al., 1977 und Solodukhin et. al., 1979], folgten Ende der 1990er Jahr mit gestiegenen Auflösungen der verfügbaren Laserdaten die ersten Auswertungen zur Segmentierung von Einzelbäumen.

Gougeon beschreibt bereits 1998 einen Ansatz zur Extraktion von Einzelbaumdaten aus Fernerkundungsdaten über einen Algorithmus, der lokale Minima verfolgt und daraus Strukturen ableitet („Valley-Following-Algorithmus“) [Gougeon, 1998]. Er nutzt hier digitale oder digitalisierte Luftbilder mit einer Auflösung bis zu 10cm/Pixel und schließt aus Schattenbereichen auf Kronengrenzen und daraus auf individuelle Bäume. In seiner Veröffentlichung schildert Gougeon sehr gute Ergebnisse ab einer räumlichen Auflösung von ca. 30cm/Pixel, beschreibt jedoch lediglich, dass 81% der erkannten Kronen tatsächlich 1:1 mit realen Kronen übereinstimmen. Es fehlt eine Angabe, wie hoch der Prozentsatz der erkannten Bäume war.

In einer umfassenderen Arbeit [Gougeon und Leckie, 2003] wird der dieser Ansatz als Möglichkeit beschrieben, Luftbilder in der Vorstufe einer Klassi-

fizierung zu segmentieren. Zur Abschätzung der Anzahl und Positionen von Einzelbäumen wird die Suche von lokalen Helligkeits-Maxima in Luftbildern beschrieben. Mit dem TREETOPS-Algorithmus wird ein grob aufgelöstes (1-2m/Pixel), manuell vorprozessiertes Bild gescannt und dabei innerhalb eines festen Ausschnittes der hellste Pixel bestimmt. Dieser wird als Spitze eines Baumes angenommen. Es erfolgt keine Unterteilung in Kronenspitze und Astspitze eines bereits erfassten Baumes, was aufgrund der geringen räumlichen Auflösung des Bildes vermutlich auch nicht erforderlich ist. Für offenes Gelände wird zusätzlich der SHADOWTT-Ansatz beschrieben, der nach Eingabe des Sonnenstandes bei der Bilderstellung anhand des Schattenwurfs Baumpositionen bestimmt. Beide Situationen – offener und dichter Bestand – können vom LATTOPS-Ansatz unterschieden werden, sodass der jeweils bessere Algorithmus gewählt werden kann.

In [Gougeon, 2009] werden die Ergebnisse auf die Nutzung von Satellitendaten ausgeweitet. In [Katoh, Gougeon, Leckie, 2009] wird auf Probleme eingegangen, die durch die feste Größe des betrachteten Ausschnitts auftreten. So werden große Bäume oft in mehrere Teile segmentiert, während Bäume mit kleiner Krone nicht getrennt werden. In [Gougeon, 2010] wird der bisherige Ansatz auf eine Verwendung von Laserscanner-Daten erweitert. Im Falle einer niedrigen Auflösung (ca. 1 Punkt / m²) können die Daten genutzt werden, um die Höhe der erkannten Bäume zu bestimmen und um Bereiche mit niedriger oder nicht vorhandener Vegetation zu erkennen und von der Berechnung auszuschließen. Laser-Daten mit hoher Auflösung (ca. 10 Punkte / m²) werden hier als geeignet beschrieben, um den Valley-Following-Algorithmus darauf anzuwenden. Im Vergleich zur Verarbeitung von Bilddaten werden die so erzielten Ergebnisse als besser positionierte und vollere Kronen beschrieben.

Hyypä und Inkinnen veröffentlichten 1999 einen Artikel zur Segmentierung und Attribuierung von Einzelbäumen [Hyypä, Inkinnen, 1999]. Dieser Artikel wird häufig als Meilenstein der Entwicklung der Einzelbaumsegmentierung angesehen. In einigen Veröffentlichungen, wie zum Beispiel [Næsset, Gobakken, et. al., 2004] wird dieser Ansatz sogar als erster Einzelbaumsegmentierungsansatz gewertet. Hyypä verwendet hier eine modifizierte Version des Wasserscheiden-Algorithmus, bei dem Kanten im Höhenprofil des Oberflächenmodells gesucht werden. Er spezifiziert hier jedoch nicht näher, an welcher Stelle Modifikationen am Algorithmus stattgefunden haben. Auch eine Erkennungsrate wird in dieser Veröffentlichung noch nicht angegeben.

Persson, Holmgren und Söderman verwendeten 2002 bereits für die damalige Zeit ungewöhnlich hoch aufgelöste Laserdaten mit ca. 5 Punkten je Quadratmeter, die bei einer sehr niedrigen Flughöhe von 130m von einem Hub-

schrauber aufgenommen wurden [Persson, Holmgren, Söderman, 2002]. Sie beschreiben ein Verfahren, bei dem die Daten zunächst mit Gaußfiltern mit verschiedenen Radien geglättet werden. Anschließend werden die verschiedenen Glättungsstufen miteinander verglichen. In der gröbsten Stufe werden auch große Bäume nur noch mit einem Maximum dargestellt, während in der feinsten Stufe auch kleinere Bäume mit einem eigenen Maximum erscheinen. Die Maxima der verschiedenen Glättungsstufen werden nun miteinander in Verbindung gebracht. Entspricht genau ein Maximum in den feinen Stufen einem in der groben Stufe, wird hier ein Baum gesetzt. Entsprechen hingegen mehrere Maxima in den feinen Stufen einem in der groben, wird durch Vergleich der Oberfläche des Lasermodells mit einem Baummodell entschieden, welche Glättungsstufe die wahrscheinlichste Hypothese darstellt. Als Baummodell wird hier eine durch eine 3D-Parabel beschriebene Oberfläche genutzt. Die Autoren geben an, dass das Verfahren eine Erkennungsrate von 71 Prozent aufweist.

Pouliot, Bell, King und Pitt beschreiben ebenfalls 2002 ein Verfahren, das Einzelbäume in Plantagen auf hoch aufgelösten Luftbildern (5cm/Pixel) erkennt [Pouliot, King, Bell, Pitt, 2002]. Dabei werden zunächst die lokalen Helligkeits-Maxima bestimmt. Anschließend wird der Helligkeitsverlauf an definierten Strahlen vom Mittelpunkt aus analysiert. Die Werte an den Strahlen werden mit einem Polynom vierten Grades verglichen und die Länge der Strahlen so variiert, dass der Fehler minimiert wird. Dadurch wird gleichzeitig ein Kronendurchmesser ermittelt. In diesem Verfahren werden an vielen Stellen Benutzervorgaben verwendet. So ist zum Beispiel die Größe des initialen Suchfensters, die Anzahl der Strahlen, die anfängliche Länge der Strahlen und der maximale Fehler einstellbar. Die Ergebnisse werden auf Luftbildern von klar strukturierten Plantagen mit visuell sehr gut trennbaren Einzelbäumen betrachtet. Der Algorithmus erzielt dabei eine Erkennungsrate von 80 bis 91 Prozent, abhängig von der verwendeten Bildauflösung. Die besten Ergebnisse wurden jedoch nicht auf den am höchsten aufgelösten Bildern, sondern auf Bildern mit 15cm/Pixel Auflösung erzielt. Die durch die geringere Auflösung erfolgte Glättung hat sich hierbei positiv auf die Erkennungsrate ausgewirkt. Die Autoren vergleichen ihren Algorithmus mit einer Variante, die lokale Maxima in festen Fenstergrößen analysiert (ähnlich dem TREETOPS-Algorithmus). Bei Verwendung fester Fenstergrößen werden abhängig von Bildauflösung und Fenstergröße Erkennungsraten zwischen 40 und 86 Prozent erzielt.

Erikson beschreibt 2003 eine Segmentierung, die auf einer Partikelsimulation basiert [Erikson, 2003]. Nach der Normierung der Bildhelligkeit des Gesamtbildes starten die Partikel dabei an einer Stelle, die potenziell die Spitze eines Baumes sein könnte. Das Verfahren ist dabei so angelegt, dass innerhalb

eines Baumes normalerweise mehrere Ausgangspunkte gefunden werden. Nun wird in jedem Schritt eine Zufallsbewegung des Partikels ausgeführt. Dazu wird zunächst ein temporärer Zielpunkt ermittelt, dessen Lage zum aktuellen Punkt sich für x- und y-Richtung getrennt jeweils über eine Normalverteilung mit festgelegter Varianz ergibt. Von diesem temporären Zielpunkt wird die Helligkeit bestimmt und der Vektor vom aktuellen Punkt zum temporären Zielpunkt damit skaliert. Dieser skalierte Vektor definiert den tatsächlichen Zielpunkt der Bewegung. Mit diesem Vorgehen wird erreicht, dass dunkle Bereiche des Bildes, die potenziell Grenzen zwischen Bäumen darstellen, weniger wahrscheinlich erreicht werden als helle Bereiche. Während der Partikelsimulation werden die Aufenthaltshäufigkeiten der Partikel protokolliert. Das Ergebnis ist ein Bild, das die protokollierten Werte als Graustufen widerspiegelt und das als Grundlage einer Segmentierung dient. In diesem Bild werden über einen Schwellenwert Bereiche mit niedriger Aufenthaltswahrscheinlichkeit ausgeblendet und anschließend zusammenhängende Regionen als Baumkandidaten bestimmt. Zu große Regionen, die dabei auftreten, werden weiter unterteilt, zu kleine verworfen.

In seiner Dissertation [Erikson, 2004] beschreibt der Autor eine Weiterentwicklung des Ansatzes, die die Kronenumrisse besser beschreibt, und gibt ein Segmentierungsergebnis an. Beide Verfahren erkennen 156 der 164 im Luftbild erkennbaren Fichten-Kronen (95,1 Prozent). Insgesamt sind jedoch 202 Bäume im Testbestand vorhanden, sodass sich eine Erkennungsrate von 77,2 Prozent ergibt.

Am Lehrstuhl von Prof. Koch in Freiburg wird im Rahmen des Natscan-Projektes eine Variante des Wasserscheiden-Algorithmus eingesetzt. Diedershausen beschreibt diesen in HALCON implementierten Ansatz in [Diedershausen, Koch, Weinacker, Schütt, 2003]. Dieser Algorithmus segmentiert ein Laserscanner-Modell in einzelne Bereiche, indem Kronen entlang der sie umgebenden Einschnitte zwischen dem jeweiligen Baum und seinen Nachbarn abgegrenzt werden. Im Gegensatz zu einem Valley-Following-Algorithmus wird dabei von den lokalen Maxima ausgegangen und ein Gradienten-Abstieg ausgeführt. Diedershausen führt anschließend noch einige Plausibilitätsprüfungen aus, um zu kleine Regionen mit Nachbarn zu verschmelzen und möglicherweise falsch segmentierte Bäume zu entfernen. Der Autor trifft keine Aussage zur Erkennungsrate.

Straub entwickelt in seiner Dissertation [Straub, 2003] ein Verfahren, um Einzelbäume aus Fernerkundungsdaten zu extrahieren. Er verwendet dabei Bild- und Laserdaten mit einer Auflösung von ca. 4-5 Messpunkten je Quadratmeter. Die initiale Segmentierung erfolgt dabei ebenfalls auf Basis des Wasserscheiden-

Algorithmus. Anschließend werden die Segmente nach den Kriterien „Größe“, „Kreisförmigkeit“, „Konvexität“ und „Vitalität“ bewertet. Der Segmentierungsschritt wird dabei für verschiedene Bildauflösung beziehungsweise verschieden starke Glättungen des Bildes berechnet, um die ideale Auflösungs- oder Glättungsstufe zu finden. Im Mittel erkennt dieser Ansatz ca. 60 Prozent der Bäume, im einzigen genannten Beispiel, das einen Wald zeigt, liegt die Erkennungsrate bei 52 Prozent der Einzelbäume. In diesem Fall hat der Algorithmus jedoch die am besten geeignete Bildauflösung verworfen und ist daher zu einem schlechteren Ergebnis gekommen.

Popescu und Wynne entwickelten 2004 den Ansatz von Gougeon weiter, indem anstelle einer quadratischen Maske ein kreisförmiges Suchfenster zum Einsatz kommt [Popescu, Wynne, 2004]. Sie verwenden für Ihre Untersuchungen Laserdaten mit einer Punktdichte von ca. 1,35 Punkten / m² und Testdaten auf einer Fläche von ca. einem Hektar. Die Autoren berechnen einen erwarteten Kronendurchmesser und skalieren das Suchfenster entsprechend. In der Arbeit sind keine Erkennungsraten genannt.

Die Gruppe um Pitkänen von der Universität Joensuu in Finnland vergleicht in [Pitkänen, Maltamo, et. al., 2004] mehrere Ansätze zur Einzelbaumerkennung. Sie verwenden für ihre Studien ein Oberflächenmodell eines Toposys-1-Scanners mit nominellen 10 Punkten je Quadratmeter. Zunächst betrachten sie lediglich die lokalen Maxima im Lasermodell. Damit werden 49,1 Prozent aller in der Realität vorhandenen Bäume erkannt. Es werden zusätzlich noch ca. 1,3 Mal so viele Bäume erkannt, die jedoch in der Realität nicht vorkommen. Betrachtet man nur die dominanten Bäume im Bestand, erkennt das Verfahren 79,4 Prozent (Tabelle 2.1, RAW). In einem zweiten Schritt wurden die Daten gaußgefiltert und dann die lokalen Maxima extrahiert. Mit diesem Ansatz ließ sich die Anzahl der zusätzlich detektierten Bäume deutlich senken, jedoch wurden auch weniger korrekte Bäume erkannt (Tabelle 2.1, GAUS). Das dritte Verfahren HBF (Height Based Filtering) verwendet Gaußfilter mit verschiedenen Radien und variiert diese abhängig von der Bestandeshöhe. Im ELIM-Verfahren wird aus der Baumhöhe auf den Kronendurchmesser geschlossen. Maxima werden nach verschiedenen Kriterien priorisiert, anschließend werden niedriger priorisierte Maxima innerhalb des Kronendurchmessers eines höher priorisierten Punktes gelöscht (Tabelle 2.1, ELIM). Das letzte Verfahren versucht eine Erkennung von Objekten (Blobs, Binary Large Objects) auf einem in Abhängigkeit des zu erwartenden Kronendurchmessers skalierten Lasermodell (Tabelle 2.1, LAP). Die letzten vier Verfahren weisen jeweils eine Erkennungsrate von ca. 40 Prozent auf. Bezieht man das Ergebnis nur auf die dominanten Bäume, so liegt die Erkennungsrate zwischen 61 und 69 Prozent.

Tabelle 2.1: Ergebnisse der fünf von Pitkänen et. al. untersuchten Verfahren [Pitkänen, Maltamo, et. al. 2004]

Verfahren	Prozentualer Anteil an allen realen Bäumen		
	Erkennungsrate gesamt	Erkennungsrate dominante Bäume	Fälschlich als Baum erkannte Strukturen
RAW	49,2	79,4	64,6
GAUS	36,7	61,4	6,6
HBf	37,0	61,2	5,9
ELIM	41,6	68,7	8,0
LAP	41,5	62,4	16,9

Garcia, Suarez und Pattenaude vergleichen in ihrer Veröffentlichung aus dem Jahre 2007 ebenfalls mehrere Verfahren [Garcia, Suarez, Pattenaude, 2007]. In diesem Fall werden die Verfahren von Gougeon, Popescu und Weinacker verglichen, die in diesem Kapitel bereits erläutert wurden. Sie verwenden dazu Testdaten aus einem Gebiet von 17,5 km² im Gebiet des Loch Lomonds und der Trosachs in Schottland mit einer Punktdichte von ca. 3-4 Punkten/m². Garcia, Suarez und Pattenaude vergleichen die Algorithmen hinsichtlich mehrerer Parameter, wie zum Beispiel Stammzahl, Baumhöhe, Kronendurchmesser und Stammdurchmesser. Für die Anzahl der erkannten Individuen ergibt sich, dass der Algorithmus von Weinacker mit 76 Prozent die meisten Einzelbäume erkannt hat, die mit realen Bäumen in Verbindung gebracht werden konnten. Allerdings hat dieser Algorithmus auch mit 52,8 Prozent die meisten zusätzlichen Bäume zurückgeliefert. Tabelle 2.2 fasst die Ergebnisse für die Anzahl der erkannten Bäume zusammen.

Tabelle 2.2: Untersuchungsergebnisse von Suarez et. al. [Garcia, Suarez, Pattenaude, 2007]

Verfahren	Prozentualer Anteil an allen realen Bäumen	
	Erkennungsrate gesamt	Zusätzlich erkannte Bäume
Gougeon	60,2	17,7
Popescu	71,8	17,5
Weinacker	76,0	52,8

Kwak, Lee, Lee, Biging und Gong verwerfen in [Kwak, Lee, Lee, Biging, Gong, 2007] die Verwendung des Wasserscheiden-Verfahrens, da hier eine Übersegmentierung stattfindet und auch kleinere Bäume, die in Lücken der Hauptschicht erscheinen, segmentiert werden. Die Autoren beziehen sich dabei

jedoch rein auf das ursprüngliche Segmentierungsergebnis, nicht auf ein Ergebnis nach der Selektion der Regionen anhand der jeweiligen Größe, wie dies beispielsweise bei [Diedershausen, Koch, Weinacker, Schütt, 2003] erfolgt. Die Autoren eliminieren zunächst deutlich herausragende, von der Breite her sehr begrenzte lokale Maxima des LIDAR-Modells, die zum Beispiel durch Sensorrauschen oder Messfehler auftreten können. Im geglätteten Modell suchen sie anschließend die lokalen Maxima. Sie verwenden nur eine sehr kleine Stichprobe von je ca. 40 Bäumen in drei Baumarten, um ihren Algorithmus zu verifizieren. Bei jeweils idealer Einstellung der Glättung werden je nach Baumart zwischen 67 und 87 Prozent der Individuen in einer 1:1-Relation erkannt.

Ke und Quackenbush stellen in ihrer Arbeit [Ke, Quackenbush, 2009] ein mehrstufiges Verfahren zur Erkennung von Einzelbäumen in Luftbildern vor. Sie verwenden zunächst ein regionenbasiertes, aktives Kontur-Model, um das Bild zu segmentieren. Anschließend erfolgt eine Einzelbaumerkennung, wobei abhängig von Eigenschaften wie der Regionengröße und der Ähnlichkeit zu Templates entschieden wird, ob es sich um einen Baum handelt. Im abschließenden Schritt werden bei den weiter unterteilten Regionen für die einzelnen Bäume mithilfe eines Gradienten-Verfahrens die Kronenumrisse bestimmt. Die Autoren vergleichen die Ergebnisse nur mit Ergebnissen einer manuellen Segmentierung des Bildmaterials, nicht mit einer terrestrischen Vollaufnahme.

Reitberger vergleicht in seiner Dissertation [Reitberger, 2010] den Wasserscheiden-Algorithmus mit einer Stammdetektion und einer Punktwolkenanalyse in so genannten Full-Waveform-Laserdaten. Dies sind Daten, bei denen kontinuierlich die Intensität der gemessenen Reflexion aufgezeichnet wird und nicht wie bei herkömmlichen Datensätzen nur die lokalen Maxima der Intensität. Er verwendet Laser-Daten mit einer Punktdichte zwischen 10 und 25 Punkten je Quadratmeter und wertet die Algorithmen auf 18 Referenzflächen mit insgesamt 3,75 Hektar Fläche aus, auf denen 1664 Bäume verschiedener Arten stehen. Für die Stammdetektion führt er eine hierarchische Untergliederung der Punktwolke aus und wertet dabei aus, welche Punkte den Stamm unterhalb der Krone getroffen haben. Aus diesen Treffern schließt er auf Baumpositionen. Seine Punktwolkenanalyse verwendet ein Verfahren, bei dem er die 3D-Punkte nach ihrer Entfernung zueinander und ihrem Helligkeitsunterschied in Verbindung setzt. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass zum einen auch Bäume in der führenden Schicht erkannt werden können, die kein eigenes Maximum im Oberflächenmodell aufweisen, es zum anderen aber auch möglich ist, Bäume im Unterstand zu erkennen. Tabelle 2.3 vergleicht die Ergebnisse aus der Arbeit von Reitberger.

Guang, Li und Wu [Guang, Li, Wu, 2010] verwenden in ihren Untersuchungen Satellitenbilder von Plantagen mit regelmäßigen Baumabständen von 2m x 5m bis hin zu 4m x 10m zur Einzelbaumerkennung. Sie nutzen ein sechststufiges Verfahren. Im ersten Schritt wird eine grundsätzliche Segmentierung des Bildes durchgeführt. Anschließend werden über den Vegetationsindex Bereiche des Bildes, die keine Bäume darstellen und zum Beispiel im Schatten liegen, herausgefiltert. Im dritten Schritt werden die eigentlichen Kronenspitzen selektiert, bevor im vierten Schritt die Größe der Kronen ermittelt wird. Im fünften Schritt werden die generierten Kronen anhand von Vegetationsindizes betrachtet, um zunächst fehlerhaft erzeugte Baumspitzen zu erkennen. Im sechsten Schritt werden die Kronenumringe abschließend noch geglättet. Wie auch bei Ke und Quackenbush werden die Ergebnisse nicht mit terrestrischen Referenzdaten, sondern nur mit einer manuellen Segmentierung des Bildes durch einen Operator verglichen. Der durchschnittliche Fehler bei der Erkennung der Anzahl der Einzelbäume wird mit 18,9 Prozent angegeben.

Tabelle 2.3: Untersuchungsergebnisse von Reitberger [Reitberger, 2010]

Verfahren	Erkennungsrate Oberschicht (%)	Erkennungsrate gesamt (%)	Zus. erkannte Bäume (% der Gesamtbaumzahl)
Wasserscheiden-Algorithmus	77	48	4
Wasserscheiden-Algorithmus mit zus. Stammsegmentierung	82	52	5
Analyse der Punktwolke	87	60	9

Heinzel, Weinacker und Koch veröffentlichten 2011 ein Verfahren, das Vorwissen bei der eigentlichen Einzelbaumerkennung berücksichtigt [Heinzel, Weinacker, Koch, 2011]. Die Idee des Verfahrens ist es, dass bei einer herkömmlichen Wasserscheiden-Segmentierung das Ergebnis (Über- oder Untersegmentierung) von der vorher ausgeführten Glättung der Daten abhängig ist. Die Autoren beschreiben ein Verfahren, um zunächst die Kronengröße für den zu betrachtenden Ausschnitt zu bestimmen. Anschließend wird das Oberflächenmodell abhängig von der Kronengröße geglättet und eine Wasserscheiden-Segmentierung ausgeführt. Das Wissen über die Kronengröße wird dabei als Vorwissen bezeichnet. Der Algorithmus erreicht auf den Referenzflächen eine Erkennungsrate von 80 Prozent.

Tabelle 2.4 stellt die hier vorgestellten Algorithmen nochmals zusammen und vergleicht – sofern in der Veröffentlichung spezifiziert – die Erkennungsraten.

Tabelle 2.4: Übersicht über den Stand der Technik bei den Einzelbaumalgorithmen

Autor	Jahr	Verfahren	Datengrundlage	Erkennungsrate (%)
Gougeon	1998	Valley-Following	Luftbilder, 100 P/m ²	
Hyypä, Inkinnen	1999	Wasserscheiden-Algorithmus	LIDAR, 10 P/m ²	
Persson, Holmgren, Söderman	2002	Adaptiver Gaußfilter	LIDAR, 5 P/m ²	71
Pouliot	2002	Suchmaske (Plantagen)	Luftbilder, 400 P/m ²	80-91
Pouliot	2002	Suchmaske	Luftbilder, 400 P/m ²	40-86
Erikson	2003	Partikelsimulation	Luftbilder	
Diedershausen, Koch, Weinacker, Schütt	2003	Wasserscheiden-Algorithmus	LIDAR	
Straub	2003	Wasserscheiden-Algorithmus	LIDAR, 4-5 P/m ²	52
Gougeon, Lecki	2003	Suchmaske	Luftbilder, 1-100 P/m ²	
Erikson	2004	Partikelsimulation	Luftbilder	77,2
Pitkänen, Maltamo, Hyypä, Yu	2004	Maxima	LIDAR, 10 P/m ²	49,2/79,4
Pitkänen, Maltamo, Hyypä, Yu	2004	Fester Gaußfilter	LIDAR, 10 P/m ²	36,7/61,4
Pitkänen, Maltamo, Hyypä, Yu	2004	Adaptiver Gaußfilter	LIDAR, 10 P/m ²	37/61,2
Pitkänen, Maltamo, Hyypä, Yu	2004	Durchmesser	LIDAR, 10 P/m ²	41,6/68,7
Pitkänen, Maltamo, Hyypä, Yu	2004	Objekt-Filter	LIDAR, 10 P/m ²	41,5/62,4

Autor	Jahr	Verfahren	Datengrundlage	Erkennungsrate (%)
Popescu, Wynne	2004	Suchmaske	LIDAR, 1 P/m ²	
Garcia, Suárez, Patenaude	2007	Valley-Following (nach Gougeon)	LIDAR, 3-4 P/m ²	60,2
Garcia, Suárez, Patenaude	2007	Suchmaske (nach Popescu)	LIDAR, 3-4 P/m ²	71,8
Garcia, Suárez, Patenaude	2007	Wasserscheiden-Algorithmus (nach Weinacker)	LIDAR, 3-4 P/m ²	76,0
Kwak, Lee, Lee, Biging, Gong	2007	Maxima	LIDAR, 1,8 P/m ²	67,4-86,7
Gougeon	2009	Valley Following	Satellit und Luftbild	
Ke, Quackenbush	2009	Konturmodell	Satellit	
Katoh, Gougeon, Lecki	2009	Valley Following	Luftbild	
Reitberger	2010	Wasserscheiden-Algorithmus	LIDAR, 10-25 P/m ²	77
Reitberger	2010	Wasserscheiden-Algorithmus	LIDAR, 10-25 P/m ²	82
Reitberger	2010	Wasserscheiden-Algorithmus	LIDAR, 10-25 P/m ²	87
Guang, Li, Wu	2010	Mehrstufiges Verfahren	Satellit	
Gougeon	2010	Valley-Following	Luftbilder, LIDAR bis 10 P/m ²	
Heinzel, Weinacker, Koch	2011	Hintergrundwissen	LIDAR, 7 P/m ²	80

2.2 Extraktion und Berechnung von Geländedaten

Aus der Gruppe um Briese und Pfeifer (TU Wien) finden sich umfangreiche Veröffentlichungen rund um die Prozessierung von Daten eines Laserscanners, insbesondere auch in Waldgebieten. In [Pfeifer, Reiter, Briese, Rieger, 1999] wird bereits ein Ansatz vorgestellt, um Bodenmodelle mit hoher Qualität in bewaldeten Gebieten aus Laserscannerdaten ableiten zu können. Die Autoren entwerfen hier Filter, um die Vegetation zu entfernen. Wege, Gräben und ähnliche Strukturen bleiben hingegen weitestgehend erhalten.

Automatische Modellierung von Waldlandschaften für
virtuelle Welten und mobile Roboter

Bücken, A.

2014, X, 194 S. 92 Abb., 16 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-06743-4